

КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА

KARELIAN RESEARCH CENTRE  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE



Ю. В. Карпечко, Н. Л. Бондарик

**ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ  
ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ  
РАБОТ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ  
ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ**

Петрозаводск  
2010

УДК 630\*116: 630\*228.81 (470.1./2)

ББК 43.4 (231)

К 26

К 26 Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России / Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 225 с.: табл. 47, рис. 42. Библиогр. 248 назв.

ISBN 978-59274-0437-7

Монография посвящена актуальным вопросам гидрологии – формированию речного стока в производных и коренных лесах. Приведена характеристика хозяйственной деятельности в лесу. Дано обоснование классификации лесов с точки зрения их гидрологической роли. Предложены методы расчета таксационных характеристик, необходимых для решения гидрологических задач. Рассмотрены методологические аспекты и предложены методы оценки изменения элементов водного баланса в результате лесопромышленной и лесохозяйственной деятельности (рубки главного пользования, рубки ухода, гидроресомелиорации). Предложены оригинальные методы расчета транспирации, испарения жидких и твердых атмосферных осадков с полога леса и испарения с наземного покрова. Рассмотрены особенности формирования элементов водного баланса в производных и коренных лесах, и даны оценки гидрологической роли рубок главного пользования и рубок ухода, в том числе и в условиях изменения климатических характеристик. Получена оценка изменения испарения и стока после проведения гидроресомелиорации. Впервые расчетным путем получена антропогенная составляющая испарения и стока в производных лесах Карелии. Монография может быть полезна для специалистов гидрологов, лесоводов, экологов, преподавателей и студентов, обучающихся по специальностям гидрология суши, лесное хозяйство и экология.

The monograph is devoted to hydrology pressing questions – the formation of runoff in secondary and climax forests. The characteristic of forest management activities is presented. The substantiation of classification of forests from the point of view of their hydrological role is given. Techniques of calculation of forest inventory parameters necessary for the decision of hydrological problems are offered. Methodological aspects are considered and the techniques of estimation of change of elements of water budget as a result of forest industry and forest management activities (clean cutting, thinning, forest reclamation) are offered. Original techniques of calculation of transpiration, evaporations of a liquid and solid precipitation from forest canopy and evaporation from the ground cover are offered. Features of formation of water budget elements in secondary and climax forests are considered. Estimations of a hydrological role of clean cutting and thinning (including estimations for changing climatic conditions) are given. The change of evaporation and runoff after forest reclamation is estimated. The anthropogenic component of evaporation and of runoff in secondary forests of Karelia is calculated for the first time. The monograph can be useful for experts in hydrology, silviculture, ecology, for teachers and the students training in specialities of hydrology, forestry and ecology.

Исследования проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 02-05-97510-p2002север\_а), Научного совета ОНЗ РАН (программы фундаментальных исследований «Изменения природно-территориальных комплексов России в зонах интенсивного техногенного воздействия», проект 9 и «Природные и социально-экономические факторы изменения окружающей среды России», проект 12).

*Финансирование издания осуществлено Российским фондом фундаментальных исследований (грант 10-05-07050-д).*

ISBN 978-59274-0437-7

УДК 630\*116: 630\*228.81 (470.1./2)

ББК 43.4 (231)

© Ю. В. Карпечко, Н. Л. Бондарик, 2010

© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2010

© Карельский научный центр РАН, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>1. Характеристика лесных биогеоценозов ЕСР</b> .....	9
1.1. Лесной фонд и характеристика хозяйственной деятельности в лесу .....	9
1.2. Коренные и производные леса .....	23
1.3. Классификации лесов по определяющим их гидрологическую роль факторам .....	26
1.4. Определение таксационных характеристик древостоя .....	32
1.5. Зависимость продуктивности леса от климатических характеристик .....	39
<b>2. Методы оценки влияния лесопромышленных и лесохозяйственных работ на водный баланс территории</b> .....	46
2.1. Методологические аспекты оценки преобразования водного баланса в результате деятельности человека в лесу .....	46
2.2. Методы оценки влияния различных рубок на элементы водного баланса .....	55
2.3. Методы оценки влияния гидролесомелиорации на элементы водного баланса .....	58
2.3.1. Расчет изменения годового стока с болота и речного водосбора из-за гидролесомелиорации .....	58
2.3.2. Расчет дополнительного стока с осушаемой и смежной территорий .....	63
2.3.3. Методы оценки изменения суммарного испарения с болота и заболоченного леса после проведения гидротехнической мелиорации .....	66
<b>3. Расчет суммарного испарения с леса</b> .....	68
3.1. Транспирация древостоем .....	70
3.1.1. Суммарная за теплый период и за год среднемноголетняя транспирация древостоем .....	70
3.1.2. Интенсивность транспирации древостоем .....	83
3.2. Испарение атмосферных осадков, задержанных пологом леса .....	93
3.2.1. Задержание пологом леса влаги от единичного дождя и испарение этой влаги .....	93
3.2.2. Усредненная величина испарения осадков с полога леса за теплый сезон .....	99
3.2.3. Испарение твердых атмосферных осадков с полога хвойного леса .....	107

3.2.4. Сравнение методов определения испарения осадков с полога леса за год . . . . .	110
3.3. Испарение под пологом леса . . . . .	112
3.4. Испарение с вырубок . . . . .	118
3.5. Сравнение методов определения среднегогодовой величины испарения с леса . . . . .	121
<b>4. Особенности формирования элементов водного баланса в лесах</b>	<b>124</b>
4.1. Испарение с леса . . . . .	124
4.1.1. Возрастная динамика транспирации и суммарного испарения с леса и влияние на нее лесорастительных условий и продуктивности древостоя . . . . .	124
4.1.2. Связь условий произрастания, продуктивности и породного состава леса с транспирацией и суммарным испарением . . . . .	133
4.1.3. Влияние климатических факторов на суммарное испарение с леса . . . . .	147
4.1.4. Роль рубок ухода в преобразовании испарения . . . . .	153
4.1.5. Относительное и абсолютное изменение испарения в результате рубок . . . . .	158
4.1.6. Оценка пространственного распределения испарения с производного леса . . . . .	160
4.2. Изменение водно-физических характеристик и водного режима почвогрунтов после рубок . . . . .	170
4.3. Формирование снежного покрова на лесных водосборах . . . . .	175
4.3.1. Существующие мнения о влиянии леса на снегонакопление . . . . .	175
4.3.2. Влияние площади полей и вырубок на снегонакопление . . . . .	176
4.3.3. Влияние температурного фактора на разницу снеготасов в лесу и в поле . . . . .	178
4.3.4. Соотношение испарения с леса и поля в зимний период . . . . .	179
<b>5. Формирование элементов водного баланса в осушаемых лесах</b>	<b>183</b>
<b>6. Сток с водосборов, покрытых производными (эксплуатируемыми) лесами</b> . . . . .	<b>194</b>
<b>Заключение</b> . . . . .	<b>203</b>
<b>Литература</b> . . . . .	<b>208</b>

*Памяти любителя леса,  
великолепного исследователя-гидролога  
и замечательного человека  
Олега Игоревича Крестовского*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Формирование водных ресурсов в лесной зоне в значительной степени определяется особенностями трансформации атмосферных осадков и солнечной радиации лесными биогеоценозами. В свою очередь проблема рационального использования лесных ресурсов требует изучения функционирования лесного биоценоза и влияния на этот процесс обуславливающих его факторов, среди которых значительное место занимает влага. Поэтому исследования вопросов, посвященных гидрологической роли леса, важны как для гидрологии, так и для лесоведения. Такая взаимосвязь нашла отражение в научной литературе. Большой вклад в изучение гидрологических процессов в лесу внесли известные российские гидрологи, лесоводы и ученые, работающие на стыке этих наук: Г. Н. Высоцкий [39], И. С. Шпак [214], А. А. Молчанов [128, 131], С. Ф. Федоров [194], О. И. Крестовский [98], В. В. Рахманов [159], Ю. Л. Раунер [158], Н. И. Руднев [165], Н. А. Воронков [37] и многие другие. Достаточно полные и подробные обзоры и анализы результатов изучения гидрологической роли леса с рассмотрением методов исследований представлены В. В. Рахмановым [159], С. Ф. Федоровым и С. В. Маруничем [197].

Таежная зона Европейского Севера России (ЕСР), в которую входят Архангельская, Вологодская, Мурманская области и республики Карелия и Коми, представляет собой интересный полигон для исследования влияния леса на гидрологические процессы. Этот интерес порождается высокой залесенностью территории, разнообразием климатических условий, породного состава и продуктивности деревьев, а также большой пространственной изменчивостью степени

освоенности территории. Здесь значительные площади занимают производные (эксплуатируемые) леса, где заготавливается необходимая для хозяйства древесина и уже неоднократно произошла смена древостоя. Однако встречаются и коренные (девственные) леса, куда по разным причинам заготовитель еще не добрался. Наличие девственных лесов характеризует, в первую очередь, слабую освоенность территории, что объясняется низкой плотностью населения.

Большая протяженность исследуемой территории как с севера на юг (~800–1100 км), так и с запада на восток (~1500–1600 км) сопровождается пространственной изменчивостью климатических характеристик, что создает условия для изучения их влияния на продуктивность древостоя и на гидрологические процессы в лесу.

Пространственная вариация природных условий, включающих климат, геологию, рельеф и плодородие почв, обуславливает соответствующий состав и распределение растительности. В широких пределах меняется по региону продуктивность лесных экосистем, повышаясь в соответствии с ростом температуры воздуха с севера на юг.

Лесная растительность, являясь продуктом климата, оказывает, в свою очередь, некоторое влияние на формирование метеорологических условий региона. Она относится к одним из главных факторов формирования на данной территории различных микроклиматических условий. Гидрофизические процессы, протекающие в лесных экосистемах, играют определяющую роль в формировании режима и абсолютных величин элементов водного баланса.

В областях и республиках, расположенных на территории ЕСР, лесная промышленность является одной из ведущих отраслей экономики. Лесохозяйственные работы и заготовка древесины здесь относятся к основным видам хозяйственной деятельности, поэтому формирование лесных экосистем происходит на значительных площадях под влиянием антропогенного фактора.

Рубки и выжигание лесной растительности относятся к наиболее древним видам хозяйственной деятельности. Леса ЕСР подвергались интенсивной эксплуатации уже с XVI века. С развитием в середине XIX столетия лесопильной промышленности потребность в древесине значительно возрастает. Наибольшее развитие лесопромышленные работы получили с внедрением в 30-х годах прошлого столетия сплошных концентрированных рубок [56]. Все

это приводило и ведет к сокращению лесной площади в целом и доли девственных лесов в частности.

До настоящего времени лес во всем мире рассматривается как возобновляемый ресурс древесины, поэтому лесозаготовка коснулась значительной части лесного фонда. На европейской территории России воздействие промышленных рубок испытали свыше 60% лесов [46]. По данным Европейской лесной комиссии, мировой объем лесозаготовок постоянно увеличивается на 0.5–3% в год [127]. Поэтому резкое сокращение лесозаготовок в 90-е годы в России может смениться интенсивным ростом объема вырубаемого леса. Вместе с тем, как уменьшение, так и увеличение интенсивности рубок ведет к изменению структуры лесного фонда (распределение площади лесного фонда по возрастным категориям и по породному составу) на водосборе, что сопровождается преобразованием его водного баланса.

Средообразующая роль эксплуатируемых лесов меняется с возрастом. По составу растительных сообществ и интенсивности протекающих в них процессов они на каждом этапе своего развития отличаются от девственных, поэтому очень важным становится вопрос о допустимом соотношении площадей естественных и преобразованных биогеоценозов с точки зрения их экологических функций. Большие проблемы в оценке и прогнозе влагооборота в лесу возникают в связи с преобразованиями условий произрастания растительности, вызванными долгопериодными колебаниями климатических характеристик.

Следует подчеркнуть, что всякие преобразования в лесных экосистемах, вызванные лесохозяйственными (рубки ухода, мелиорация) и лесопромышленными работами (рубки главного пользования), в наибольшей степени отражаются на водном режиме малых рек, которые также часто становятся объектами водохозяйственной деятельности. В частности, на них сооружаются водохранилища для небольших ГЭС, а, по мнению некоторых ученых [20], строительство малых и средних ГЭС является одним из возможных направлений развития энергетики в Карелии.

Заметное влияние на сток более крупных рек может оказать преобразование возрастной структуры древостоя на большой площади, что происходит при резких и продолжительных изменениях интенсивности эксплуатации лесного фонда.

Получение объективной оценки влияния характеристик леса на элементы водного баланса конкретного водосбора представляет собой достаточно сложную задачу. В некоторой степени это объясняется несовершенством методик, направленных на решение данной проблемы, но в большей степени связано с трудностями получения необходимой информации. В настоящее время известно, что испарение с леса, а, следовательно, и сток с залесенных водосборов, зависят от различных характеристик древостоя: от породы, возраста, условий произрастания и продуктивности. Вместе с тем до недавнего времени информацию о распределении покрытой лесом площади водосборов по преобладающим породам, классам возраста и бонитета получить было очень сложно. Поэтому многие исследования гидрологической роли леса посвящены изучению зависимостей, в частности, стока от наиболее доступной характеристики – лесистости [37, 66, 149, 159 и др.], хотя, нужно отметить, что приведенные значения этого показателя включают в себя существенные в некоторых случаях ошибки. Недостатки такого подхода показаны О. И. Крестовским [98]. Однако эти исследования сыграли большую роль в лесной гидрологии. Они показали, что влияние леса на гидрологические процессы многогранно и определяется не только его наличием на водосборе. Нужно отметить, что и до сегодняшнего дня роль основных характеристик леса (породный состав, тип леса, продуктивность и даже возраст) далеко не в полной степени освещена. Однако в настоящее время с внедрением различных компьютерных технологий получение информации о характеристиках леса, определяющих гидрологические процессы на конкретном водосборе, с технической точки зрения не представляет больших сложностей, что может способствовать развитию гидрологии леса.

Представленные в данной работе результаты исследований относятся к той части территории России, где основными породами являются сосна, ель и береза. Данное обстоятельство является ограничивающим фактором для использования приведенных здесь моделей на большей части лесной зоны России. Вместе с тем авторы надеются, что отличия породного состава изучаемого леса не станут препятствием для применения в других регионах некоторых их идей, методологических и методических разработок.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ ЕСР

## 1.1. Лесной фонд и характеристика хозяйственной деятельности в лесу

Большая часть территории ЕСР расположена в северо- и средне-таежной подзонах [96] (рис. 1.1, табл. 1.1), что свидетельствует о достаточно суровых климатических условиях в целом, определяющих соответствующую продуктивность лесных биогеоценозов и породный состав древостоя (табл. 1.2). Заметная доля территорий северных административных образований (Архангельская, Мурманская области и Республика Коми) относится к зоне тундры.

Таблица 1.1

### Распределение таежной зоны по территориям республик и областей ЕСР, % [182]

Область, республика	Доля зоны тайги	Доля подзон тайги		
		северная	средняя	южная
Архангельская	53	21	32	–
Вологодская	100	–	38	62
Мурманская	59	59	–	–
Карелия	100	52	47	1
Коми	84	42	41	1

Средняя лесистость территории ЕСР составляет около 47%. По регионам она колеблется от 34% для Мурманской и Архангельской областей до 69% для Республики Коми. Величины лесопокрываемых площадей и распределение основных пород древостоя по республикам и областям ЕСР приведены в табл. 1.2.

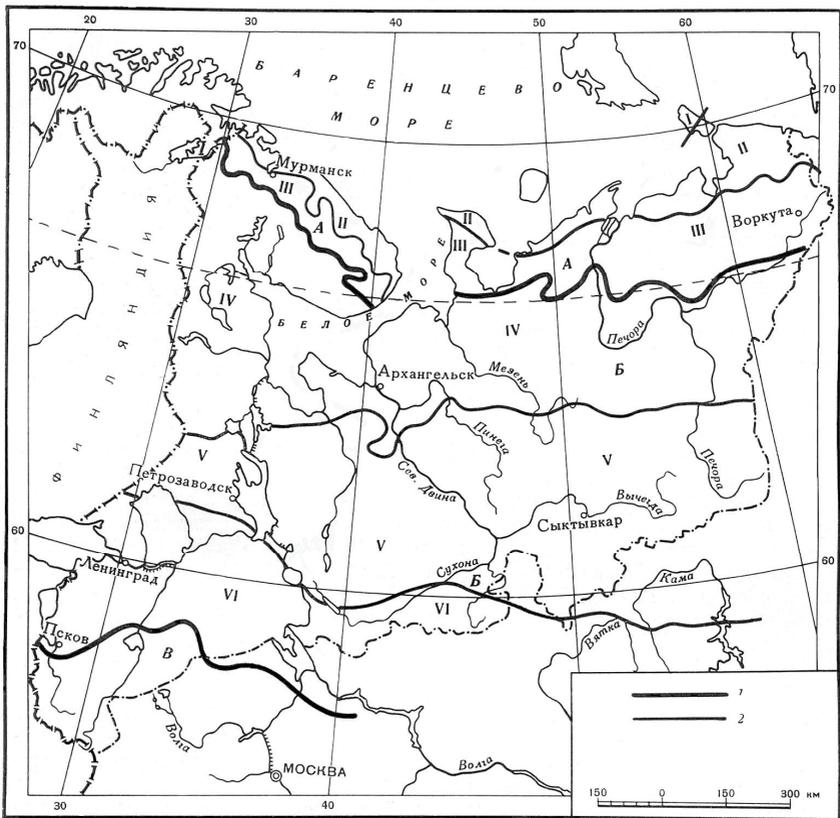


Рис. 1.1. Физико-географическое районирование ЕСР (по [96])

А – зона тундры: I – подзона арктических тундр; II – подзона кустарничковых и мохово-лишайниковых тундр; III – подзона кустарничковых тундр и предтундрового редколесья. Б – зона тайги: IV – подзона северной тайги; V – подзона средней тайги; VI – подзона южной тайги. В – зона смешанных лесов. Границы: 1 – зон; 2 – подзон

Таблица 1.2

**Распределение покрытых лесом земель по основным  
лесообразующим породам [184]**

Область, республика	Площадь, тыс. га					Лесис- тость, %
	Сосна	Ель	Листвен- ница	Береза	Осина	
Архангельская	5398.4	11295.5	54.6	2888.5	210.9	34
Вологодская	1708.4	2028.1	1.4	2538.6	559.1	47
Мурманская	2155.4	1514.8	0.6	1302.7	0.4	34
Карелия	5914.2	2332.1	1.0	939.8	58.0	59
Коми	7072.3	15984.3	196.7	4346.7	662.4	69

Доминирующими породами являются хвойные, причем в Республике Карелия и в Мурманской области преобладают сосняки, а на остальной территории региона наибольшую часть залесенной площади занимают ельники. Хвойные породы вместе с березняками представляют практически всю лесопокрытую часть лесного фонда в данных субъектах РФ. На долю остальных пород в Карелии и Мурманской области приходится менее 1%, в Коми и Архангельской области – соответственно около 5 и 1% и только в Вологодской области их доля возрастает до 9%. Следовательно, сосняки, ельники и березняки на территории ЕСР являются средоформирующими породами.

Участие лиственных пород в формировании лесных биогеоценозов увеличивается с севера на юг. Это обусловлено, с одной стороны, изменением климатических условий и плодородия почв, с другой – возрастанием интенсивности лесорубочных работ в южном направлении, а лесовосстановление, особенно ельников, часто идет через лиственные породы.

Заготовка древесины в лесу осуществляется посредством рубок, которые разделяются на рубки главного пользования и рубки промежуточного пользования (рубки ухода). Гидрологическая роль рубок зависит от их вида.

Рубками промежуточного пользования решаются задачи по улучшению породного состава древостоя, повышению качества и устойчивости насаждений, сохранению и усилению средозащитных и средообразующих свойств леса, увеличению размера потребления древесины с единицы площади и сокращению сроков

выращивания высокопродуктивного хозяйственно-ценного спелого древостоя. К ним относятся рубки ухода за молодняками (осветление, прочистки), прореживания и проходные рубки [135]. Уходу за лесом начали уделять большое внимание в середине 60-х годов XX века. Площадь территории, затронутой этими рубками, менялась по годам, однако она никогда не превышала 1% лесопокрытой площади. В частности, в лесах Карелии в наиболее благоприятные периоды ее доля достигала только 0.6%. В этой связи становится очевидным, что отражение этих работ на гидрологических процессах можно наблюдать только на малых водосборах.

Уход за молодняками (осветление и прочистки) в зависимости от климатических характеристик и условий произрастания проводят до 20–30 лет. Он направлен, во-первых, на формирование наиболее выгодного с хозяйственной точки зрения состава древостоя, что заключается в освобождении хвойных деревьев от заглушающего влияния лиственных пород, во-вторых, в ходе его выполнения создается оптимальная для роста густота и более равномерное размещение деревьев по площади.

При прореживании, выполняемом в зависимости от климатических условий в возрасте древостоя от 21 до 50 лет, осуществляется отбор деревьев, лучших по скорости роста, форме ствола и качеству древесины, и создаются оптимальные условия для их роста.

Завершающим этапом отбора деревьев лучшего качества являются проходные рубки, которые в хвойных лесах проводятся в возрасте древостоя свыше 40–50 лет. Рубки ухода должны заканчиваться в хвойных лесах за 20 лет, а в лиственных – за 10 лет до наступления возраста, при котором проводятся рубки главного пользования.

При всех видах рубок рекомендуется вырубать в зависимости от лесорастительных и климатических условий в среднем 25–35% от запаса древостоя [135].

При выполнении рубок промежуточного пользования меняются радиационные характеристики леса, породный состав, полнота древостоя и запас древесины, а, следовательно, и соотношения величин испарения различными частями леса. Причем снижение транспирации древостоем, являющейся основной расходной частью водного баланса в высокопродуктивных лесах, в которых и выполняются рубки ухода, приводит к уменьшению суммарного

испарения, что будет показано ниже. Кроме того, работа лесозаготовительной техники на площади, отводимой для технологических коридоров (около 20% площади лесосеки), приводит к изменению в них водно-физических свойств почвогрунтов, что в той или иной мере также отражается на формировании стока.

Рубками главного пользования осуществляется заготовка древесины и замена спелого или переспелого леса молодым. Количество заготавливаемой древесины при этом в конкретном регионе соответствует объему расчетной лесосеки (объем вырубаемого древостоя). Для определения последнего существует множество подходов, основным принципом которых является поддержание неистощимого лесопользования, что достигается при соответствии между объемами вырубаемого и прирастающего древостоя [171].

В зависимости от организации и технологии выполнения рубок главного пользования они подразделяются на сплошные, постепенные и выборочные. Два последних способа по своим гидрологическим последствиям занимают промежуточное положение между рубками промежуточного пользования и сплошными, что является одним из объяснений малого внимания к ним в гидрологической литературе и в данной работе.

Наибольшее распространение в лесоизбыточных районах России, к которым относится территория Европейского Севера, имеют сплошные рубки, предназначенные для заготовки древесины в больших объемах [12, 102]. При этом способе весь древостой удаляется за один прием в течение короткого периода с площади до 200 га, а перемещение лесозаготовительной техники сопровождается преобразованием водно-физических свойств почвогрунтов и нарушением состояния наземного растительного покрова, что приводит к коренным изменениям условий формирования элементов водного баланса. Хотя такие резкие преобразования происходят на ограниченной территории, они могут оказывать существенное влияние на формирование стока с малых водосборов. Площадь ежегодных рубок, проводимых в 90-х годах в регионах ЕСП, и их доля от лесопокрытой части лесного фонда приводится в табл. 1.3. Учитывая продолжительность облесения вырубок и роста древостоя, данная и нижеприведенная информация дает представление о состоянии лесного фонда в исследуемом регионе в настоящее время.

Таблица 1.3

**Средняя площадь рубки главного пользования леса  
в областях и республиках ЕСР за 1986–1990 годы  
(по данным [75] в обработке авторов)**

Область, республика	Площадь, тыс. га			Доля вырубок, %
	территории	лесопокр.	вырубок	
Архангельская	58740	19851.5	170.5	0.9
Вологодская	14570	6876.5	77.0	1.1
Мурманская	14490	4973.9	23.9	0.5
Карелия	15690	9267.4	142.6	1.5
Коми	41590	28751.1	178.2	0.6

В Карелии максимальное количество древесины было заготовлено в 1967 году (по данным В. И. Саковца). В 60-е годы XX века древесины вырубалось больше, чем предусмотрено расчетной лесосекой, в 70–80-е годы объем лесозаготовок приближался к допустимо возможной величине, а в 90-е годы произошло резкое сокращение объема рубок (табл. 1.4). Такое распределение соотношения между расчетной лесосекой и фактическим объемом вырубленной древесины характерно для всего региона, и только в Республике Коми расчетная лесосека использовалась не полностью даже в периоды интенсивной эксплуатации лесного фонда [52, 183].

Таблица 1.4

**Динамика объема лесозаготовок по главному пользованию  
в лесах Карелии [170]**

Показатели	Годы										
	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2003
Расчетная лесосека, млн м <sup>3</sup>	24.6	19.3	14.3	14.3	14.3	12.0	9.8	9.5	9.5	9.3	9.2
Объем лесозаготовок, млн м <sup>3</sup>	12.9	17.4	18.5	15.6	14.3	11.0	10.4	9.3	6.0	6.4	6.1
Площадь вырубок, тыс. га	109.4	146.4	136.1	118.2	106.7	81.5	29.9	31.3	33.9	32.3	31.9

В первую очередь лес вырубался в обжитых районах и вдоль транспортных путей: крупных рек и озер, железных и автомобильных дорог. Поэтому в настоящее время на этих участках произрастают молодые леса, которые часто, особенно в более южных районах, представлены лиственными породами.

Лесовосстановление на вырубках и других не покрытых лесом площадях осуществляется как естественным, так и искусственным путем.

Для возможно более полного восстановления леса на всей площади вырубок большое внимание в лесном хозяйстве уделяется искусственному лесовосстановлению (созданию лесных культур). Хотя нужно отметить, что лесопользование в таежной зоне долгое время считалось неистощимым, поэтому до начала XX века лесопосадки практически не проводились. Резкое возрастание объема лесокультурных работ в таежной зоне ЕСР отмечается в 1966–1970 годах. О развитии этих работ на всей территории ЕСР можно судить по Карелии (табл. 1.5).

*Таблица 1.5*

**Динамика лесокультурных работ в Карелии, тыс. га [48–51, 75]**

До 1966	1981–1985		1966–1985		1993	1994	1996	1997
всего	всего	среднее за год	всего	среднее за год				
205.4	191.6	38.3	958.2	47.9	16.5	16.2	13.6	10.4

Естественное возобновление леса на вырубках или пожарищах является составной частью общего поступательного природного процесса и экономически выгоднее по сравнению с искусственным лесовосстановлением. Его интенсивность определяется многими факторами, к основным из которых относятся тип вырубленного леса, состав древостоя и биологические особенности деревьев.

В ряде случаев восстановление леса естественным путем протекает очень медленно, хотя в целом, как отмечается Т. И. Кищенко и И. Ф. Козловым для Карелии [91], идет удовлетворительно. Только на 11% всей площади вырубок восстановление леса естественным путем не происходит. Однако часто вырубки хвойных пород, особенно это заметно в ельниках, на первых этапах зарастают лиственными породами (березой и осиной), которые на последующих

этапах развития заменяются материнским древостоем [75, 113, 162]. Более успешно и быстро восстанавливаются сосновые леса суходольных местоположений в северной и среднетаежной подзонах. По различным исследованиям в условиях Карелии при естественном лесовозобновлении за десятилетний период хвойными породами зарастают от 39 до 45% вырубок [64, 91]. Зарастание вырубок еловых лесов на 85% площади лесосек происходит лиственными породами.

В связи с многофакторностью процесса возможны различные пути развития лесного биогеоценоза после рубки даже одинакового типа леса. Большое влияние на лесовосстановление оказывает технология рубок, определяющая размер вырубки и наличие подроста. На небольших по площади вырубках, а также на больших с сохранившимся подростом, восстановление леса происходит обычно хвойными материнскими породами древостоя.

По И. С. Мелехову, число этапов в формировании постоянного типа леса, соответствующего условиям местопроизрастания, может быть четыре и более [12]. Первым этапом в развитии типа леса является тип вырубки. Второй этап – облесившаяся вырубка с сомкнутым молодняком. При этом породный состав деревьев может соответствовать условиям местопроизрастания и, следовательно, вырубленному материнскому лесу или быть представленным лиственным древостоем. В последнем случае имеют место третьи и четвертые этапы развития леса [12].

Типы вырубок отличаются по видам растений, населяющих их, по интенсивности и направлению преобразования растительного покрова. Эти различия обусловлены расположением в рельефе местности, механическим составом и плодородием почв, их водным и тепловым режимом, микроклиматическими характеристиками. В частности, в северо- и среднетаежной подзонах Мурманской области и Карелии выделяют 14 типов вырубок, на формирование которых не оказывали влияние пожары, и 6 паловых вариантов [162].

Особенностью ЕСР является наличие большой площади заболоченных лесов и болот, где древостой характеризуется низкими темпами роста и низкими запасами древесины. Большая заболоченность территории обусловлена высокой увлажненностью и

сравнительно низкой испаряемостью (табл. 1.6). Климатические условия, а также бедность почв и материнских пород Севера карбонатами кальция определяют преобладание здесь низкопродуктивных верховых типов болот, и только в Мурманской области, видимо, вследствие большой расчлененности рельефа и больших уклонов, определяющих высокую проточность, верховые болота занимают менее 10% от площади всех болот (табл. 1.6).

Таблица 1.6

**Площадь болот и заболоченных лесов и распределение болот по типам торфяной залежи**

Область, республика	Площадь болот и забол. лесов		Типы болот, %		
	тыс. км <sup>2</sup>	%	Низинные	Переходные	Верховые
Архангельская	198.3	34	9	40	51
Вологодская	23.7	16	1	14	85
Мурманская	37.7	26	26	68	6
Карелия	54.5	35	13	33	54
Коми	205.0	49	16	14	70
В среднем	519.2	32	13	34	53

Влияние климатического фактора на формирование типов болот и торфа иллюстрируется рис. 1.2, где представлена полученная с использованием данных С. М. Новикова и Л. И. Усовой [141] зависимость доли низинного торфа в регионе от индекса сухости (отношение остаточного члена радиационного баланса к осадкам).

Следствием неблагоприятного для развития сельского и лесного хозяйств водного режима почв на значительной части территории является широкое развитие гидромелиоративных работ. Осушение болот в России для расширения площадей сельхозугодий ведется уже более 200 лет [94]. В конце XIX века в Олонецкой губернии были начаты и гидролесомелиоративные работы [121, 192].

Наибольшее развитие гидротехническая мелиорация получила в бывшем СССР, в том числе и на Европейском Севере, в 60-е годы, и эти работы интенсивно проводились до 1990 года. К концу этого периода площадь переувлажненных земель, осушенных для лесного хозяйства, достигла на Европейской части России более 3.5 млн га [215], около 50% этой величины составила площадь осушенных лесов на ЕСП. Гидротехническая мелиорация проводилась

как на минеральных землях, так и в заболоченных лесах и на слабооблесенных и безлесных болотах. В Карелии площадь мелиорируемых болот и заболоченных лесов для лесного хозяйства в 1990 году превышала 700 тыс. га, более 40% этой площади занимали болота. Вследствие перевода части земель сельскохозяйственного назначения и лесного фонда в ведение сельских (поселковых) администраций и в категорию земель запаса, а также выделения охранных зон, площадь земель, учитываемая как осушенная, сократилась [40, 50, 90].

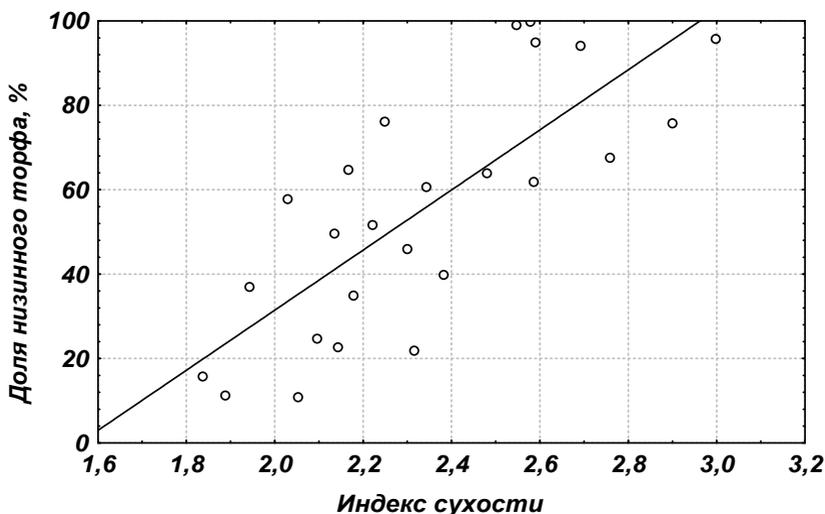


Рис. 1.2. Зависимость доли низинного торфа в регионе от климатического фактора

Следует отметить, что период, в который интенсивно развивались мелиоративные работы в России, характеризуется высокими темпами строительства осушительных систем и в ряде стран Западной Европы. Так, например, в Швеции пик мелиоративных работ приходится на 1984 год. В этот год там было осушено 70 000 га переувлажненных земель [237]. В дальнейшем интенсивность мелиоративных работ снизилась в связи с изменением взглядов на экологическую роль переувлажненных территорий. Однако во многих странах (в США, Польше, Великобритании, Дании, Нидерландах и

некоторых др.) осушено к настоящему времени более 60% болот и заболоченных земель [115, 116]. Низкая освоенность переувлажненных земель в регионах ЕСР иллюстрируется табл. 1.7.

Таблица 1.7

**Освоенность болот и заболоченных земель в отдельных регионах  
[141, 183, 192]**

Страна, регион	Площадь болот и заболоченных земель		Площадь осушенных болот		
	тыс. км <sup>2</sup>	%	тыс. км <sup>2</sup>		%
			в лес. хоз.	в сел. хоз.	
Финляндия	98.0	32	57.0	7.0	65
Карелия	54.5	35	6.5	0.8	13
Коми	205	49	1.01	0.50	1
Мурманская обл.	37.70	26		0.18	0.5
Архангельская обл.	198.29	34	3.48	0.86	2.2
Вологодская обл.	23.7	16	2.33	2.38	20

На первых этапах развития гидролесомелиорации для ускорения сбросов излишков воды и понижения уровня почвенно-грунтовых вод (УПГВ) использовалась регулирующая осушительная сеть с глубиной каналов 1.0–1.5 м и расстоянием между ними 120–200 м. При таком способе осушения снижение уровня воды наблюдалось только в приканавной полосе и желаемого лесоводственного эффекта не получали. В дальнейшем проводили сгущение сети, доводя в отдельных случаях расстояние между осушителями до 40 м. Эта величина зависит от климатических условий, определяющих водный режим осушаемого объекта, поэтому она является зональной и уменьшается с юга на север. Для Карелии В. М. Медведева рекомендует при глубине каналов 0.6–1.0 м расстояние между ними принимать в зависимости от глубины и вида торфа, механического состава подстилающих грунтов в пределах 30–90 м [121]. Применение такой редкой осушительной сети и сравнительно мелких каналов возможно только при небольших нормах осушения. По существующим требованиям к началу роста корневой системы (в южной Карелии конец мая) УПГВ не должен быть выше 20–25 см. На уже мелиорированных лесных участках Карелии средние за вегетационный сезон уровни вод редко опускаются ниже 50 см [121]. При таком положении не приходится ожидать большой

величины дополнительного стока после строительства осушительной сети. Этот вывод будет подтвержден приведенными ниже результатами расчетов. Важной особенностью гидролесомелиоративного освоения болот и заболоченных лесов в России является сохранение естественного растительного покрова.

Понижение УПГВ на болотах и заболоченных лесных участках приводит к изменению водно-воздушного режима и водно-физических свойств верхних слоев осушенных почвогрунтов, и создаются условия для повышения их продуктивности.

Эффект гидролесомелиорации зависит от возраста насаждений в год осушения, продолжительности осушения и плодородия почв (тип леса (болота)). Чем больше питательных веществ в почве и моложе древостой перед началом осушения, тем значительно изменяется его прирост по диаметру и в высоту. На бедных почвах верхних болот прирост деревьев менее существенный.

Анализ, выполненный нами по опубликованным данным [10, 121], показывает, что при продолжительности осушения более 10 лет основными факторами, определяющими интенсивность среднегодового прироста сосны, являются тип леса до осушения и возраст древостоя. Продолжительность осушения в этом случае уже не оказывает существенного влияния. Наиболее значительную роль возраст играет в лесах моложе 80 лет (рис. 1.3).

Разброс точек, особенно в той части кривой, которая характеризует реакцию молодняка на осушение, объясняется влиянием на интенсивность прироста древостоя продуктивности (типа) осушаемого болота. При осушении даже в молодом возрасте низкопродуктивных болот увеличения прироста не отмечается (рис. 1.3).

Увеличение лесохозяйственной эффективности может быть достигнуто за счет большего потребления элементов минерального питания и влаги. При совпадении благоприятных условий (возраст и тип леса) дополнительный прирост древесины достигает  $10 \text{ м}^3/\text{га}$  в год, однако, в реальных условиях этот показатель составляет  $0.7\text{--}2 \text{ м}^3/\text{га}$  в год [94]. В Карелии, в среднем по всем типам болот, в результате гидролесомелиорации получен дополнительный прирост древесины в  $1 \text{ м}^3/\text{га}$  в год [90]. Для среднетаежной подзоны авторами работы [11] дана оценка изменения лесорастительных условий в результате гидролесомелиорации (табл. 1.8).

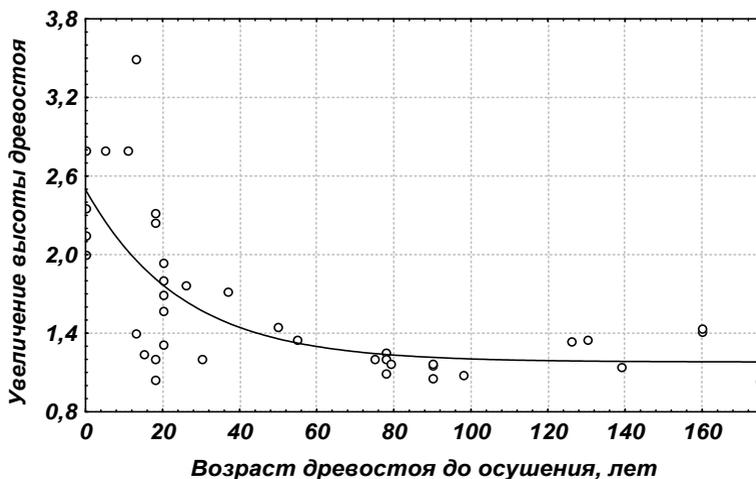


Рис. 1.3. Зависимость прироста древостоя в высоту в результате мелиорации (отношение измеренной высоты древостоя после мелиорации к его высоте в естественных условиях) от возраста до осушения

Таблица 1.8

**Изменение прироста древесины ( $\Delta M$ ) в результате гидролесомелиорации в различных типах леса среднетаежной подзоны (по [11])**

Тип леса	Класс бонитета		$\Delta M$ , м <sup>3</sup> /га год
	до осушения	после осушения	
Ельники			
Травяно-сфагновый, осоково-сфагновый, таволговый	V	III	2.5–3.5
Сфагновый, хвощово-сфагновый	V–Va	IV	1.5–2.0
Сосняки			
Травяно-сфагновый, вахтово-сфагновый, осоково-сфагновый	V	III	2–4
Кустарничково-сфагновый, сфагновый	V–Va	IV–V	1–2
Сосна по болоту	Vб	V–Va	<1

В работах [21, 81] показано, что на прирост 1 м<sup>3</sup>/(га год) древесины затрачивается 90–100 мм влаги. Сопоставляя эти величины с данными табл. 1.8, можно предположить, что в результате гидролесомелиорации произойдет заметное увеличение испарения.

Понижение УПГВ на слабооблесенных и безлесных болотах приводит к их облесению. По мнению В. М. Медведевой [121], этот процесс при наличии источников обсеменения длится 1–15 лет. Наиболее быстро появляется древесная растительность на низинных и переходных болотах. Следовательно, гидролесомелиорация ведет к снижению заболоченности и увеличению лесистости водосборов.

В среднем на территории ЕСР доля осушенных угодий не превышает в настоящее время нескольких процентов от ее общей площади. Однако они неравномерно распределены по территории. Основной объем мелиоративных работ выполнялся в более благоприятных в климатическом отношении районах, поэтому здесь на отдельных небольших водосборах осушаемые земли занимают свыше 10% от площади бассейна. Поскольку процесс преобразования осушаемых земель и после прекращения мелиоративных работ в лесу будет продолжаться еще длительный период, то это вызывает необходимость разработки методов оценки и долгосрочного прогноза влияния гидромелиорации на гидрологический режим водоемов и водотоков.

Приведенный выше анализ лесного фонда ЕСР и хозяйственной деятельности в лесу дает представление о многообразии условий, при которых происходит формирование элементов водного баланса в эксплуатируемом лесу. Поэтому одной из важных проблем является поиск возможных путей минимизации числа факторов, определяющих трансформацию солнечной энергии и атмосферных осадков. В частности, при оценке влияния на сток изменений растительного покрова на начальных стадиях лесовосстановления в южной тайге О. И. Крестовский [98], основываясь на особенностях формирования элементов водного баланса, нашел возможным объединить все пути возобновления леса в три большие группы. В каждой из этих групп зарастание вырубок и дальнейший рост леса, по мнению О. И. Крестовского, идет сходным путем и с одинаковой интенсивностью.

Другие подходы к классификациям леса, направленным на оптимизацию решения задач по оценке гидрологической роли хозяйственных работ в лесу, будут рассмотрены ниже.

## 1.2. Коренные и производные леса

В зависимости от состава растений и возрастной структуры деревьев леса таежной зоны делят на девственные и производные (эксплуатируемые). Синонимами определения «девственные леса» являются «климаксовые» и «коренные». Последнее определение чаще встречается в лесоводственной литературе.

Коренными называют лесные экосистемы, которые длительное время (более 300 лет) не подвергались воздействию катастрофических факторов (рубки, ветровалы, массовое размножение вредителей, пожары и т. д.). Из приведенных в литературе [35] определений следует, что коренные леса представляют собой относительно устойчивую фазу естественного развития лесных сообществ, наиболее соответствующую экологическим условиям данной местности в данный геологический период.

Конкретные признаки коренных лесов, дающие представление об особенностях формирования в них элементов водного баланса, заимствованы нами из работы Л. Б. Заугольной и Е. А. Платоновой [63]:

– максимально полное наличие видов растений, экологические свойства которых соответствуют параметрам определенного экотопа;

– все популяции древесных видов и кустарников характеризуются полночленными онтогенетическими спектрами, а древостой – абсолютной разновозрастностью.

В коренных еловых лесах древостой в возрасте старше 200 лет составляет основной запас древесины (40–50% объема) [34]. Перестойные ельники (160–200 лет) и по площади занимают около половины (51.9%) лесного участка [4]. Вместе с тем, вследствие своей теневыносливости ели представлены непрерывным возрастным рядом от всходов (1–2 года) до предельно старых (400–430 лет) [4, 34]. Благодаря такой возрастной структуре, в ельниках поддерживаются устойчивые условия формирования элементов водного баланса. Нарушения их пространственной однородности происходят на локальных участках, где в результате отпада старых деревьев образуются окна в пологе, под которыми происходит смена наземной растительности. Такие локальные преобразования должны

сопровождаться некоторым изменением суммарного испарения. Кроме того, наличие этих окон создает условия для перераспределения проникающих под полог леса осадков и влияет на пространственное распределение влагозапасов почвогрунтов. Однако в целом для достаточно большой площади, даже в пределах выдела, данные преобразования в древостое не могут повлиять на усредненные величины элементов водного баланса.

В светолюбивых сосняках возрастная структура несколько иная, чем в ельниках. Здесь молодое поколение сосны появляется только в том месте, где в результате отпада образуется изреженность полога до степени сомкнутости 0.4–0.5. Поэтому в сосняках встречаются только два или три четко выраженных поколения и разница между ними достигает 100–200 лет. Наибольшую долю в запасе древесины, так же как и в ельниках, составляет древостой в преклонном возрасте – старше 140 лет [34]. Все это дает основание предполагать наличие некоторых циклов в годовом испарении, которые повторяют цикличность процессов отпада и восстановления деревьев. Однако амплитуды этих циклических колебаний испарения, при отмечаемой исследователями ярусности в строении древостоя [34], не могут быть большими, и подтверждением этому является то, что после отпада старого дерева окно остается заполненным более молодым и интенсивно растущим. Кроме того, циклы отпада и восстановления древостоя, определяющие колебания испарения, сглаживаются при пространственном его осреднении, так же как и в ельниках.

Такое представление о процессах позволяет сделать вывод, что в однотипных коренных лесах вариации испарения и стока связаны в большей степени с колебаниями метеорологических и климатических характеристик. Наложение на эти факторы биологических процессов, связанных с развитием биоценоза, может отражаться только на ограниченной площади, меньшей по размеру выдела.

Коренные леса встречаются в местах, удаленных от транспортных магистралей, населенных пунктов и промышленных объектов. Поэтому в Европе их массивы чаще сосредоточены на севере России. В настоящее время ведется работа по сохранению коренных лесов в различных природных условиях [57, 62, 145]. В освоенных

лесных районах России отмечается тенденция увеличения площади лесов, где интенсивная лесопромышленная деятельность запрещена.

Россия относится к немногим странам мира, где коренные леса занимают большую часть площади. Данные экосистемы относятся к тем сообществам, которые, по мнению некоторых ученых, компенсируют антропогенные нарушения [47]. В частности, в работе В. В. Горшкова и др. [45] утверждается, что для поддержания устойчивого, пригодного для жизни состояния окружающей среды коренные леса должны покрывать не менее 90%, а вторичные (производные) леса – не более 10% общей территории.

Коренные леса, нарушенные деятельностью человека или природными факторами, называют производными. Основная, с гидрологической точки зрения, особенность производных лесов, большая часть которых относится к постоянно эксплуатируемым, заключается в значительной вариации площадей, занятых лесами, различающимися по породному составу и возрасту. Это определяет как пространственные, так и временные вариации элементов водного баланса. При одинаковых от года к году объемах заготовки древесины такие вариации водного баланса могут быть заметны только на малых водосборах. Изменения интенсивности эксплуатации лесного фонда республики, области или целого государства (как наблюдалось в России в 90-х годах), приводящие к преобразованию возрастной структуры лесов, сопровождаются преобразованием водного баланса крупных водосборов. Наблюдаемое изменение стока на ряде рек Карелии в последние десятилетия может быть объяснено уменьшением среднего возраста лесов от 119 лет в 1960 году до 79 лет в 1997 году.

Высокая интенсивность лесохозяйственной деятельности (особенно в отдельные периоды), а также многообразие типов леса, возможных путей его восстановления после рубок главного пользования и пожаров обуславливают большую дифференциацию эксплуатируемого лесного фонда по породному и возрастному составу древостоя, что в значительной степени определяет пространственную вариацию элементов водного баланса и преобразование их во времени.

Вышеприведенный анализ характеристик производных и коренных лесов показывает значительное различие между ними по показателям, которые определяют формирование элементов водного баланса, поэтому их выделение на водосборах ЕСР должно способствовать уточнению и упрощению решения гидрологических задач. Вместе с тем многообразие лесных экосистем и большое количество связанных с ними факторов, влияющих на гидрофизические процессы, диктует необходимость более детальной классификации произрастающих на водосборах лесов.

### **1.3. Классификации лесов по определяющим их гидрологическую роль факторам**

Конкретизируя для леса общие и хорошо известные представления о формировании элементов водного баланса, можно перечислить основные факторы, определяющие в лесу в той или иной степени годовые суммы испарения и стока. К таким факторам относятся состояние и видовое разнообразие растительности наземного покрова, породный состав древостоя, его возраст, условия произрастания и продуктивность. Основываясь на этих показателях, можно выбрать лесные участки, где практически одинаково протекают процессы трансформации атмосферных осадков и солнечной энергии, определяющие формирование испарения и стока. Систематизировать процесс выделения таких лесных участков и установить их количество можно с помощью теории множеств.

Лесной массив какого-либо водосбора можно представить как множество ( $\Xi$ ), элементами которого являются единицы представителей наземной ( $\omega_{x,i}$ ) и древесной ( $\omega_{y,k,kl,T}$ ) растительности (элементы  $\omega_{x,i}$  и  $\omega_{y,k,kl,T}$  принадлежат множеству  $\Xi$ , что можно записать в следующем виде  $\{\omega_{x,i}, \omega_{y,k,kl,T}\} \in \Xi$ ) [146]. Индексы элементов являются их отличительными признаками, к которым отнесены вид наземной растительности (i), порода деревьев (k), класс бонитета (kl) и возраст древостоя (T).

Каждый лесной массив состоит из участков (выделов), различающихся по доминирующим видам или группам видов наземной растительности и по древесным породам. Поэтому индекс i

(1, 2, ...n) обозначает доминирующий в том или ином случае  $i$ -тый вид наземной растительности или ее отсутствие, а индекс  $k$  (1, 2, ...m) обозначает породу древостоя. Пусть подмножества ( $F_{xi}$ ) данного множества образуются одновидовыми растениями наземного покрова, т. е. их элементы отличаются индексом  $i$  ( $\{\omega_{x,1}, \omega_{y, k,kl,T}\} \in F_{x1}$ ;  $\{\omega_{x,2}, \omega_{y, k,kl,T}\} \in F_{x2}$ ; ...  $\{\omega_{x,n}, \omega_{y, k,kl,T}\} \in F_{xn}$ ), при этом  $F_{x1, x2, \dots, xn}$  включены в множество  $\Xi$  ( $F_{x1, x2, \dots, xn} \subset \Xi$ ). Количество подмножеств  $F_{xi}$  равно  $n$  – количеству видов или групп видов наземной растительности. Эту величину, основываясь на справочной литературе, можно принять равной 7 ( $n = 7$ ) [107, 108]. В данных подмножествах выделяются подмножества ( $O_{yk}$ ) с одинаковым по породному составу древостоем. На территории ЕСР основными породами, как это указано выше, являются сосна, ель и береза. В смешанном древостое выделение производится по доминирующей породе с учетом состава. Следовательно, количество подмножеств  $O_{yk}$  будет равно произведению  $m$  на  $n$ , что составляет 21. Следует считать, что такое количество подмножеств характеризует наиболее «благоприятные» условия и близко к максимально возможной величине.

Каждое из подмножеств  $O_{yk}$  разделяется на подмножества  $P_{kl}$ , в которых будут представлены участки леса с одинаковым по продуктивности древостоем, характеризваемым классом бонитета.

Класс бонитета является функцией высоты и возраста древостоя. Основных классов бонитета пять (I, II, III, IV, V), дополнительных – два (Ia, Va), кроме того, выделяют еще в отдельных случаях Ib, Ib, Vб, Vв классы. Классы бонитетов Ib, Ib, Ia, I, II характеризуют высшую продуктивность лесного биогеоценоза, а V, Va, Vб и Vв – низшую. Для определения класса бонитета используются сведенные в таблицы зависимости высоты древостоя от возраста [108]. Эти зависимости свидетельствуют о достаточно интенсивном возрастании высоты с течением времени в молодом и среднем возрасте и о затухании этих изменений в приспевающем и спелом древостое. Интенсивность роста древостоя определяется классом бонитета, поэтому для каждого класса бонитета построена своя зависимость. Наибольшие высоты древостоя одного и того же возраста относятся к высшим бонитетам (Iв, Ib, Ia, I, II), а наименьшие – к низшим (V, Va, Vб и Vв).

Число подмножеств  $P_{ki}$  в каждом из подмножеств  $O_{yk}$  будет равно количеству классов бонитета в данном лесном массиве, т. е. не более 11, а для ЕСР число лесных участков, различающихся по классам бонитета, видимо, можно принимать равным 6. Для коренного леса эта операция будет последней. По-видимому, максимальное количество подмножеств  $P_{ki}$  в лесном массиве ЕСР не должно превышать 126 (произведение 21 на 6).

Однако производный лес различается еще по возрасту, поэтому заключительным этапом данной классификации является выделение в подмножествах  $P_{ki}$  подмножеств  $Q_T$ , отличительным признаком которых является класс возраста. Для хвойных пород класс возраста составляет 20 лет (к I классу относятся деревья в возрасте 1–20 лет, ко II классу – 21–40 лет, ... к V классу – 81–100 лет и т. д.), а для мягколиственных (береза, осина, ольха) – 10 лет (в I класс входят деревья возраста 1–10 лет, во II класс – 11–20 лет, ... в V класс – 41–50 лет) [12]. Принятие класса возраста в качестве элементарной единицы возрастного ряда обусловлено тем, что изменения таксационных характеристик за меньший, чем 20 лет (10 лет для лиственных пород), период не приводят, как показывают расчеты, к заметным преобразованиям элементов водного баланса. В северо- и среднетаежной подзонах рубки главного пользования рекомендуется проводить в эксплуатационных лесах, возраст которых достиг VI–VII классов [170], поэтому в каждом лесном участке конкретного класса бонитета выделяется около 6 подмножеств. Всего подмножеств  $Q_T$  в реальном лесном массиве ЕСР будет около 756 (произведение 126 на 6). При решении практических задач количество таких подмножеств, по-видимому, будет сокращено.

Таким образом, множество  $\Xi$  можно рассматривать как сумму непересекающихся подмножеств. Для коренного леса такое разбиение множества  $\Xi$  представляется в следующем виде:  $P_{ki} \subset O_{yk} \subset F_{xi} \subset \Xi$ , для производного леса – в виде:  $Q_T \subset P_{ki} \subset O_{yk} \subset F_{xi} \subset \Xi$ .

Такое же разбиение, выполненное в различных лесных массивах, дает возможность выделить участки с одинаковыми признаками элементов (вид наземной растительности, породный состав, класс бонитета и класс возраста древостоя (последний признак для

производного леса), являющимися факторами формирования испарения. Так как для измерения испарения используется независимая от площади единица – миллиметр высоты слоя, то, выделив в подмножествах  $P_{kl}$  коренного леса или  $Q_T$  производного леса единичные по площади подмножества, нужно среди них выбрать равные. Испарение с таких подмножеств (лесных участков)  $P_{kl}$  и  $Q_T$ , характеризуемых равными определяющими его факторами, будет практически одинаковым. В большом эксплуатируемом лесном массиве региона можно встретить также участки с древостоем одинакового возраста.

Данное представление очень важно для обоснования возможности использования такой характеристики, как среднемноголетнее годовое испарение с одновозрастного производного леса. Поскольку конкретный лес конкретного возраста существует один год, то в качестве среднемноголетнего испарения такого лесного участка можно принимать среднюю величину испарения с равных подмножеств  $P_{kl}$  одного и того же возраста. Обоснование возможности такого подхода будет приведено ниже.

Нужно отметить, что получение возрастной динамики испарения и стока с лесного участка важно при оценке влияния рубок и гидролесомелиорации на водные ресурсы. Решением такой задачи являются усредненные для данных климатических условий величины изменения испарения и стока.

Для решения практических задач по гидрологии в качестве однородных по условиям формирования испарения можно использовать лесные участки, выделенные на основе типологической классификации лесного фонда. В лесоводстве понятие «тип леса» используется как показатель условий произрастания. Этот показатель, наряду с количественной оценкой продуктивности (класс бонитета), в настоящее время может быть принят в качестве характеристики условий формирования элементов водного баланса.

Наиболее пригодным для решения гидрологических задач, по нашему мнению, является подход к выделению типов В. Н. Сукачева. В его представлении, тип леса – это участки леса (отдельные лесные биогеоценозы), однородные по составу древесных пород, ярусам растительности и фауне, микробному населению, климатическим, почвенным и гидрологическим условиям, взаимоотноше-

ниям между растениями и средой, внутри- и межбиогеоценоценозному обмену веществом и энергией, восстановительным процессам и направлению смен в них [12].

В определение типа леса входят название преобладающей породы и название вида или группы видов растений наземного покрова. В общем виде тип леса соответствует подмножеству  $O_{ук}$ . Но если в гидрологии вид наземного растения рассматривается обычно как фактор испарения, то в лесоводстве использование растений наземного покрова позволяет характеризовать плодородие почв и их водный режим, что следует рассматривать, как качественную характеристику продуктивности древостоя. В табл. 1.9 приведена классификация типов хвойного леса В. Н. Сукачева применительно к исследуемому региону [12, 108], дополненная характерными для данного региона классами бонитетов из [154, 155].

Таблица 1.9

**Классификация типов хвойного леса В. Н. Сукачева с характерными для ЕСР классами бонитетами**

Группы типов	Типы	Классы бонитетов		
		Северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга
Сосняки травяные	Сосняки травяные	IV–V	III–IV	III
Сосняки-зеленомошники	Сосняки-кисличники	III–IV	II–III	II
	Сосняки-черничники	IV	III	II–III
	Сосняки-брусничники	IV–V	III–IV	III
Сосняки лишайниковые	Сосняки лишайниковые	V–Va	V	IV–V
Сосняки-долгомошники	Сосняки-долгомошники	V–Va	IV–V	IV
Сосняки сфагновые	Сосняки сфагновые	Va–Vб	Va	Va
Ельники-зеленомошники	Ельники-кисличники	–	II–III	II
	Ельники-черничники	IV–V	III–IV	III
	Ельники-брусничники	V	IV	III–IV
Ельники-долгомошники	Ельники-долгомошники	V–Va	IV–V	IV
Ельники болотно-травяные	Ельники травяно-сфагновые	V	IV–V	IV–V
Ельники сфагновые	Ельники сфагновые	Va	V–Va	V
	Ельники осоково-сфагновые	V–Va	V	V

Характерными для тайги древесными породами являются хвойные, для данного региона – сосна и ель, поэтому классификация В. Н. Сукачева представлена только для этих пород. Заселивший вырубку березняк имеет зачастую ту же наземную растительность, что и предшественник, поэтому его разделяют практически на те же типы, что и хвойный лес.

Для исследуемой территории наиболее распространенными являются зеленомошные, долгомошные и сфагновые группы типов [91, 104, 122, 123]. Наиболее продуктивными являются зеленомошные леса, среди которых на территории ЕСП преобладают черничники и брусничники. В этих лесах заготавливается наибольшее количество древесины, и различные изменения в них, связанные с климатом или деятельностью человека, в значительной степени определяют водный баланс водосборов.

Наряду с чистыми насаждениями, состоящими из деревьев одной породы, достаточно часто встречаются смешанные насаждения, представленные двумя или более породами. При этом состав древостоя характеризуют условной формулой, состоящей из одной или двух начальных букв названия породы и цифр, отмечающего долю участия породы в общем запасе насаждения, принимаемого за 10 единиц. Так, например, формула 7С2Е1Б свидетельствует о том, что 70% запаса насаждения составляет сосна, 20% – ель и 10% – береза. Порода, доля которой большая, называется господствующей или преобладающей. В формуле ее ставят на первое место. Кроме того, в зависимости от хозяйственной ценности выделяют еще главную породу.

Каждый тип леса характеризуется достаточно широким спектром продуктивности, предопределяющим необходимость выделения двух или даже трех классов бонитета (см. табл. 1.9), что соответствует выделению подмножеств  $P_k$ . Поэтому при выделении гидрологически однородных участков коренного леса следует использовать два показателя: тип леса и класс бонитета. Для производного эксплуатируемого леса при решении этой задачи добавляется еще и третий показатель – возраст древостоя. Такой подход согласуется с приведенной выше классификацией, основанной на теории множеств.

Столь подробная, как указано выше, дифференциация лесного массива в настоящее время не всегда оправдана. Она должна опре-

деляться видом решаемых гидрологических задач и точностью существующих методов расчета испарения с леса. Возможны объединения по группам типов леса (см. табл. 1.9) и по группам классов возраста. В лесоводстве принято разделять древостой на следующие группы классов возраста: молодняки – I–II, средневозрастные – III–IV, приспевающие – V, спелые – VI–VII, перестойные – VIII и более старшие классы возраста [108].

#### 1.4. Определение таксационных характеристик древостоя

В данном разделе приводятся методы расчета или формализация имеющихся зависимостей только для тех характеристик древостоя, которые используются в рассматриваемых ниже моделях элементов водного баланса. Речь идет о средней высоте древостоя, запасае и приросте стволовой древесины, массе листвы (хвои) и листовом индексе.

Для определения высоты древостоя по известному классу бонитета и возрасту, а также класса бонитета по высоте и возрасту древостоя предназначаются таблицы (бонитировочные шкалы). Эти таблицы опубликованы в различных лесотаксационных справочниках, в том числе в [107, 108]. В данной работе использовалась их версия, разработанная М. М. Орловым [108]. Следует отметить, что для каждого бонитета зависимость между средней высотой и возрастом отлично (коэффициенты корреляции линеаризованных связей около 0.95) описывается логарифмическими регрессионными уравнениями вида:

$$h_{Bi} = a + b \ln(\tau), \quad (1.1)$$

где  $h_{Bi}$  – средняя высота древостоя  $i$ -того класса бонитета, м;  $\tau$  – возраст древостоя, лет;  $a$  и  $b$  – коэффициенты регрессии.

Значение  $h_{Bi}$  при построении данной зависимости принималось осредненным для приведенного интервала высот конкретного возраста.

Данные зависимости при выполнении гидрологических расчетов являются более удобными, чем существующие таблицы.

Коэффициенты регрессии  $a$  и  $b$  предлагается определять по линейным уравнениям:

для семенных насаждений

$$a = -16.54 - 1.35 Kl, \quad r = -0.98, \quad (1.2)$$

$$b = 4.84 + 1.11 Kl, \quad r = 0.99, \quad (1.3)$$

где  $Kl$  – показатель класса бонитета древостоя, обозначенный арабскими цифрами (принятые обозначения Ia, I, ..., V, Va заменены на 7, 6, ..., 2, 1).

Замена принятых обозначений класса бонитета выполнена для удобства использования его в формулах. Полученные таким образом величины для их отличия от традиционных названы показателями класса бонитета. Расчет по формулам (1.1)–(1.3) дает вполне удовлетворительные результаты при определении средней высоты древостоя для возрастов выше 20 лет.

Изменение средней высоты деревьев в семенных насаждениях при возможных изменениях класса бонитета, вызванных преобразованием условий произрастания, предлагается определять по формуле:

$$\Delta h_{Bi} = 1.35 \Delta Kl - 1.11 \Delta Kl \ln(\tau). \quad (1.1')$$

Формула (1.1') получена при совместном решении регрессионных уравнений (1.1)–(1.3).

При наличии информации о возрасте и средней высоте древостоя класс бонитета с точностью  $\pm 1$  определяется по линейному регрессионному уравнению:

$$Kl_{\tau} = ak h_{\tau} + bk, \quad (1.4)$$

где  $Kl_{\tau}$  – класс бонитета древостоя в возрасте  $\tau$ ;  $h_{\tau}$  – средняя высота древостоя возраста  $\tau$ ;  $ak$  и  $bk$  – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии  $ak$  и  $bk$  аппроксимируются уравнениями логарифмического вида:

$$ak = -0.13 \ln(0.2\tau - 2.07) + 0.65, \quad (1.5)$$

$$bk = -1.17 \ln(0.32\tau - 0.79) + 2.59. \quad (1.6)$$

Запас стволовой древесины можно представить в виде функции высоты и полноты древостоя (степени плотности стояния деревьев на единице площади насаждения). В работе Н. П. Анучина [9] данная зависимость имеет следующий вид:

$$M = A(h - a)Ctr, \quad (1.7)$$

где  $Ctr$  – полнота древостоя;  $h$  – средняя высота древостоя, м;  $A$  и  $a$  – параметры, которые для сосны, ели и березы соответственно равны 16.9 и 1.6; 19.2 и 3.2; 14.3 и 3.7.

Для лесов Карелии зависимости между запасом древостоя и его высотой по породам при полноте, равной 1, на основании данных таблиц [107], представлены нами в следующем виде:

$$\text{для сосны} \\ M = 0.44 \exp(0.04h + 6.56) - 333.20, \quad (1.7^1)$$

$$\text{для ели} \\ M = 0.58 \exp(0.04h + 6.26) - 321.37, \quad (1.7^2)$$

$$\text{для березы} \\ M = 1.11 \exp(0.03h + 5.74) - 355.67. \quad (1.7^3)$$

Высоту древостоя в зависимости от возраста и класса бонитета для эмпирических уравнений (1.7<sup>1</sup>)–(1.7<sup>3</sup>) следует определять по формулам (1.1)–(1.3).

При решении гидрологических задач, связанных с оценкой и прогнозированием преобразования водного баланса территорий в результате лесопромышленной деятельности или мелиорации, следует учитывать существующие типологические особенности возрастного развития древостоя, что отражается на динамике высоты и запаса стволовой древесины. Поэтому важное значение приобретает информация о возрастных изменениях таксационных показателей различных типов и классов бонитета леса. Для южной подзоны тайги данные о динамике таксационных характеристик по типам и классам бонитета леса получены А. А. Книзе, частично они приведены в [92].

Для северо- и среднетаежной подзон на основании обобщения большого количества опубликованных данных получены аппроксимирующие зависимости высоты и запаса стволовой древесины от возраста древостоя для каждой комбинации типа и класса бонитета леса. Высота и запас древостоя аппроксимировались полиномиальной зависимостью:

$$h = a + b \tau + c (\tau)^2, \quad (1.8)$$

$$M = d + e \tau + f (\tau)^2, \quad (1.8')$$

где  $h$  и  $M$  – средняя высота (м) древостоя и запас (м<sup>3</sup>/га) стволовой древесины;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  и  $f$  – коэффициенты регрессии, значения которых приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

**Параметры полиномов (1.8) и (1.8')**

Тип леса, бонитет	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Сосняки						
Брусничный III кл.	-0.684	0.329	-0.0011	-35.309	6.318	-0.024
Брусничный IV кл.	-1.492	0.272	-0.0008	-56.547	5.890	-0.021
Брусничный V кл.	0.133	0.197	-0.0006	8.706	1.734	-0.004
Черничный II кл.	0.708	0.364	-0.0012	32.081	6.689	-0.023
Черничный III кл.	-0.415	0.333	-0.0011	-24.320	5.423	-0.020
Черничный IV кл.	-0.617	0.281	-0.0010	-47.994	5.826	-0.028
Черничный V кл.	0.749	0.191	-0.0006	-18.948	2.888	-0.012
Зеленомошный III кл. *	-0.764	0.341	-0.0012	-41.796	5.961	-0.0210
Зеленомошный IV кл. *	-1.312	0.273	-0.0008	-66.481	6.090	-0.0241
Зеленомошный V кл. *	0.826	0.184	-0.0005	-3.244	2.156	-0.0062
Сфагновый V кл.	0.627	0.157	-0.0004	4.480	1.416	-0.0004
Сфагновый Va кл.	0.243	0.110	-0.0003	1.259	1.285	-0.0028
Лишайниковый V кл.	0.276	0.187	-0.0006	6.497	1.175	-0.0002
Средний V кл.	1.188	0.167	-0.0005	0.026	1.907	-0.0051
Ельники						
Черничный III кл.	-0.026	0.290	-0.0009	-6.413	4.939	-0.014
Черничный IV кл.	-0.853	0.280	-0.0009	-21.058	4.433	-0.015
Черничный V кл.	-0.258	0.176	-0.0004	-9.306	2.892	-0.007
Березняки						
Кисличный I кл.	-0.220	0.496	-0.0025	-12.450	4.861	-0.018
Черничный II кл.	-0.570	0.397	-0.0017	-20.610	3.743	-0.010
Черничный III кл.	0.010	0.280	-0.0005	-5.231	2.647	-0.003

*Примечание.* \*Коэффициенты регрессии для зеленомошных групп сосняков III–V классов бонитета рассчитаны по объединенным характеристикам брусничных и черничных типов.

Важным показателем состояния древостоя, характеризующим влагооборот леса в целом, является прирост всей его биомассы или только стволовой древесины. В ряде работ [21, 81, 194, 203 и др.] показаны зависимости транспирации или суммарного испарения от прироста стволовой древесины. Значения текущего прироста стволовой древесины приводятся в таксационных описаниях. Эта величина является функцией запаса древесины, класса бонитета и возраста древостоя. Проведенный нами анализ показал, что отношение прироста древесины к ее запасу практически не зависит от продуктивности леса (класса бонитета) и для каждой породы определяется только возрастом древостоя. Данная зависимость может быть представлена в следующем виде (рис. 1.4):

$$\Delta M/M = e \exp(-g\tau). \quad (1.9)$$

Следовательно, при наличии данных о запасе древесины и возрасте древостоя текущий прирост рассчитывается по уравнению:

$$\Delta M = eM \exp(-g\tau), \quad (1.10)$$

где  $\Delta M$  – текущий прирост запаса стволовой древесины, м<sup>3</sup>/(га год);  $e$  и  $g$  – коэффициенты, зависящие от породы древостоя.

На рис. 1.4 в качестве примера приведены зависимости  $\Delta M/M = f(\tau)$  для ельников разных типов (интервал классов бонитетов – от II.5 до V.5).

Значения коэффициентов  $e$  и  $g$ , полученных нами для основных произрастающих в Карелии пород древостоя по данным региональных таблиц [107] и с использованием опубликованных в [108] данных о запасе и приросте древесины для разных бонитетов, приведены в табл. 1.11. Различия в их значениях объясняются, по-видимому, тем, что в региональных таблицах данные о приросте приведены для конкретного возраста, а в [108] опубликованы данные об усредненном за каждые 10 лет текущем приросте.

Таблица 1.11

**Коэффициенты формулы (1.10) для разных пород древостоя**

Коэффициент	Сосна	Ель	Береза
$e$	0.12/0.08	0.16/0.09	0.27/0.12
$g$	0.027/0.023	0.030/0.021	0.056/0.035

*Примечание.* В числителе приведены значения коэффициентов, полученных с использованием таблиц [107], в знаменателе – [108].

Следует отметить, что в работе [25] убедительно обосновывается зависимость удельной продуктивности дерева (отношение прироста по объему дерева ( $\Delta M_d$ ) к его объему ( $M_d$ ) только от его возраста. Полученное авторами работы уравнение имеет аналогичный уравнению (1.9) вид:

$$\Delta M_d / M_d = \beta \exp(-\alpha \tau). \quad (1.11)$$

Для сосновых и лиственных деревьев коэффициенты регрессии  $\alpha$  и  $\beta$ , приведенные в [25], равны 0.024 и 0.13.

Поскольку объем отдельного дерева пропорционален объему (запасу) стволовой древесины на участке, а прирост по объему пропорционален приросту запаса стволовой древесины, то можно

считать, что обоснование, приведенное в [25] для (1.11), является справедливым и для (1.9) и подтверждает наши выводы. В этом убеждает также и близость значений коэффициентов регрессии в (1.9) (табл. 1.11) и в (1.11) для соответствующей породы.

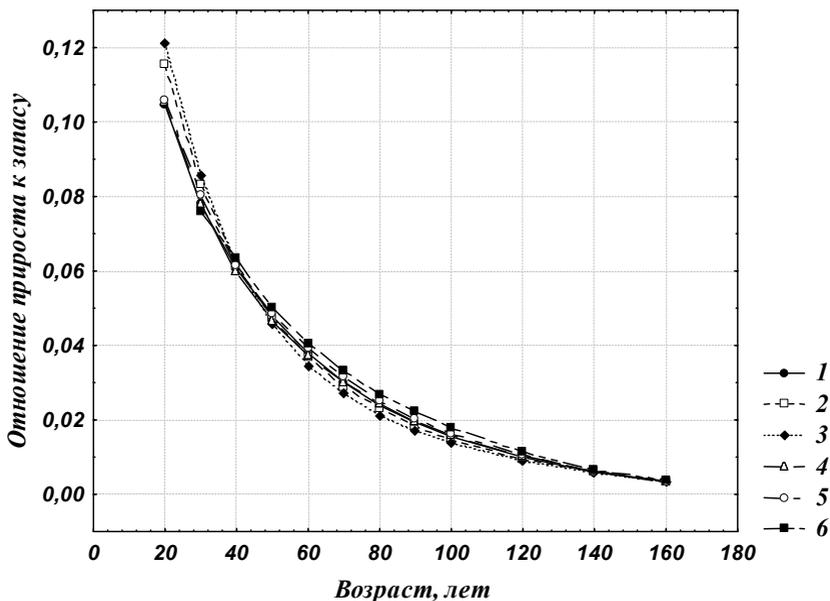


Рис. 1.4. Зависимость относительной величины текущего прироста к запасу от возраста для различных типов ельников (1 – брусничный, 2 – черничный свежий, 3 – кисличный, 4 – черничный влажный, 5 – болотно-травяной, 6 – долгомошный)

Между материальными и энергетическими явлениями в растительном покрове существует тесная связь [202], поэтому в качестве теоретической основы вышеизложенного можно использовать результаты исследования связей между динамикой запаса биомассы и поступлением энергии к лесу, выполненного Г. Ф. Хильми. Всю поглощаемую древостоем солнечную радиацию он разделяет на две части: количество энергии, затрачиваемое на поддержание существующей биомассы, и количество энергии, затрачиваемое на создание новых клеток, тканей и органов (прирост). Отношение этих двух потоков остается постоянным для всех бонитетов [202].

С точки зрения материальных явлений это соответствует для каждой породы одновозрастного древостоя равенству для всех бонитетов отношений объема общей биомассы к его приросту (или отношений прироста к объему общей биомассы) (величину общей биомассы и ее прирост с некоторой долей приближения можно принять пропорциональными запасу и приросту стволовой древесины), что подтверждает объективность уравнений (1.9) и (1.11).

Проверка формулы (1.10) осуществлялась на независимом полевом материале, приведенном в работах [69, 71, 72]. Среднеквадратические отклонения между представленными в указанных работах и рассчитанными по (1.10) величинами текущего прироста для 32 насаждений сосняка составили 2.7, для 17 насаждений ельника – 0.8 и для 9 насаждений березняка – 1.0 м<sup>3</sup>/(га год). При этом измеренные значения изменялись в сосняке от 2.1 до 7.6, в ельнике – от 2.1 до 8.1 и в березняке – от 2.2 до 6.5 м<sup>3</sup>/(га год). Приведенные оценки относятся к тем результатам расчетов, которые получены по (1.10) с использованием приведенных в числителях ячеек табл. 1.11 коэффициентов регрессии. Применение коэффициентов регрессии, помещенных в знаменателях ячеек табл. 1.11, дало несколько другие результаты. Так для сосняка среднеквадратическое отклонение составило 2.2, для ельника – 2.0 и для березняка – 1.4 м<sup>3</sup>/(га год). При существующей точности полевых определений таксационных характеристик в целом для насаждений данные показатели следует, по-видимому, признать удовлетворительными, поэтому формулу (1.10) можно использовать для приближенной оценки текущего прироста.

Влагооборот древесной растительности осуществляется через листовую аппарат, поэтому при вычислении суммарного испарения необходимо знать количественные характеристики листьев (здесь и далее в это понятие входит и хвоя), которые в настоящее время используются во многих методах определения транспирации. В качестве таких характеристик используются масса листы (в гидрологических расчетах, как правило, в сыром виде) и листовой индекс (отношение площади листы крон к площади проекции крон на горизонтальную плоскость).

Массу листы определяют по срубленным модельным деревьям. На основании обработки большого числа экспериментальных данных лесоводами были разработаны методы определения этого

показателя по характеристикам древостоя, приводимых в таксационных описаниях. Эти методы были реализованы в виде таблиц или формул и представлены в работах [70, 108 и 220].

Выраженная в табличном виде зависимость между массой листвы, с одной стороны, и породой древостоя, его средней высотой и запасом стволовой древесины, с другой стороны [108], была нами формализована и представлена следующей формулой [18, 90]:

$$m = MKc \exp(-dh), \quad (1.12)$$

где  $m$  – масса листового аппарата, т/га;  $K$  – коэффициент, показывающий долю хвои (листвы) в общем запасе 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 и для березы – 0.30, 0.083.

Проверка этой формулы была выполнена с использованием натуральных данных (их количество равно 32) о массе хвои в различных по возрасту сосняках черничном и брусничном, приведенных в [69]. Расхождения в средних значениях составили около 1%, а среднее квадратическое отклонение наблюдаемых величин от рассчитанных – 3.3 т/га. Такое расхождение, учитывая точность полевых определений массы листвы, следует считать приемлемым, поэтому формулу (1.12) можно рекомендовать для практического использования.

Величину используемого в гидрологических расчетах листового индекса ( $LAI$ ) древесных пород можно определять по соотношению [85]:

$$LAI = k_l m, \quad (1.13)$$

где  $k_l$  – переходный коэффициент, га/т.

Коэффициент  $k_l$  был получен нами для некоторых древесных пород на основании обработки большого количества опубликованных данных и составляет для сосны – 0.35; для ели – 0.28; для кедра – 0.52 и для березы – 0.62 [85].

### **1.5. Зависимость продуктивности леса от климатических характеристик**

Долгопериодные колебания климатических характеристик отражаются на видовом разнообразии и продуктивности растительного покрова, что, несомненно, сказывается на испарении с него

и в целом на водном балансе территории. Поэтому в качестве одного из подходов к прогнозированию преобразования водного баланса территории для случаев изменения климата можно использовать метод, основанный на зависимости испарения от продуктивности растительного покрова. Хорошо известно, что растения обладают высоким значением экологической амплитуды, поэтому одинаковые типы леса встречаются в различных климатических условиях, отличаясь продуктивностью (классом бонитета) древостоя. Этот показатель, характеризующий интенсивность прироста биомассы и расход влаги, в значительной степени связан с климатическими факторами, к основным из которых относятся температура воздуха и атмосферные осадки. Осредненная по регионам, входящим в ЕСР, зависимость запаса и прироста древостоя от суммы температур выше  $10^{\circ}\text{C}$  ( $\Sigma T_{>10}$ ) показана в табл. 1.12.

Таблица 1.12

**Средний запас и средний годичный прирост древесины на 1 га  
([183] в обработке авторов)**

Область, республика	$\Sigma T_{>10}$	Средний запас, м <sup>3</sup> /га		Средний прирост, м <sup>3</sup> /(га год)	
		всех деревьев	в том числе хвойных	основных пород	в том числе хвойных
Архангельская	1105	113.2	122.3	1.1	1.0
Вологодская	1620	116.7	132.8	1.8	1.4
Мурманская	862	41.6	50.0	0.4	0.4
Карелия	1387	106.1	111.3	1.1	1.0
Коми	1161	107.6	112.7	1.0	0.9

Самым теплым на территории ЕСР регионом является Вологодская область, она и характеризуется наиболее высокими запасами и приростами древостоя. Для самой холодной Мурманской области эти показатели более чем в 2 раза ниже (см. табл. 1.12). Количественным показателем условий произрастания, определяющих запас и прирост древостоя, является класс бонитета. Поэтому для прогнозных оценок и расчетов влияния колебаний и изменений климата на испарение с леса первоочередной задачей является получение зависимостей класса бонитета от температуры и осадков.

Анализ связи между продуктивностью древостоя и климатическими факторами (атмосферными осадками и суммой активных температур выше  $10^{\circ}\text{C}$ ) для территории Европейской части России для хвойных лесов был выполнен Н. И. Казимировым и др. [154, 155]. В этих работах приводятся аналитические зависимости классов бонитета ели и сосны от указанных климатических факторов. Для березняков материал был собран нами по многочисленным опубликованным источникам.

Выполненный с помощью множественной линейной регрессии анализ показал, что изменчивость классов бонитета насаждений лесной зоны России на 80–95% определяется изменением суммы температур и почти не зависит от атмосферных осадков. Для зоны высокого увлажнения, к которой можно отнести территорию ЕСР, влияние колебаний осадков на интенсивность роста древостоя должно быть еще меньше. Этот вывод в некоторой степени соответствует результатам дендрологических исследований А. А. Молчанова [129], который заключает, что в условиях Севера ширину годовичного кольца лимитирует температура воздуха, а осадки не оказывают влияния на вариацию прироста древесины. Данный вывод относится к Карельскому перешейку, для южной части Карелии выделить роль температуры и осадков А. А. Молчанову не удалось.

Полученный для таежной зоны вывод о преобладающем влиянии на продуктивность древостоя температуры позволил нам рассмотреть зависимости класса бонитета только от одного этого фактора. Нужно отметить, что при выводе эмпирических уравнений использовалось не принятое в лесоводстве обозначение класса бонитета, а уже примененное ранее (раздел 1.4), поэтому функциями искомых уравнений являются показатели класса бонитета ( $KI$ ). Наиболее надежно связи  $KI = f(\Sigma T_{>10})$  аппроксимируются логарифмическими уравнениями (рис. 1.5) вида

$$KI = a + b \cdot \ln(\Sigma T_{>10}). \quad (1.14)$$

Зависимости, полученные нами по данным Н. И. Казимирова и др. [154, 155] для хвойных лесов, являются очень тесными. Коэффициенты корреляции линеаризованных связей для всех рассматриваемых типов леса превышают 0.97. Это обусловлено тем, что в указанных работах приведены осредненные для административных

областей по типам леса классы бонитетов. Построенные для березняков связи вида (1.17) по данным, полученным для каждого типа конкретного леса, характеризуются меньшими коэффициентами корреляции. Однако для наиболее распространенной в северных лесах зеленомошной группы типов они колеблются от 0.6 до 0.8.

Наибольшие отклонения эмпирических точек от аппроксимирующих зависимостей вида (1.14) отмечаются при суммах температур, превышающих 2500 (рис. 1.5), т. е. южнее исследуемой территории. Следовательно, данные зависимости вполне пригодны для прогнозирования изменения класса бонитета при повышении или понижении температуры воздуха на территории ЕСР.

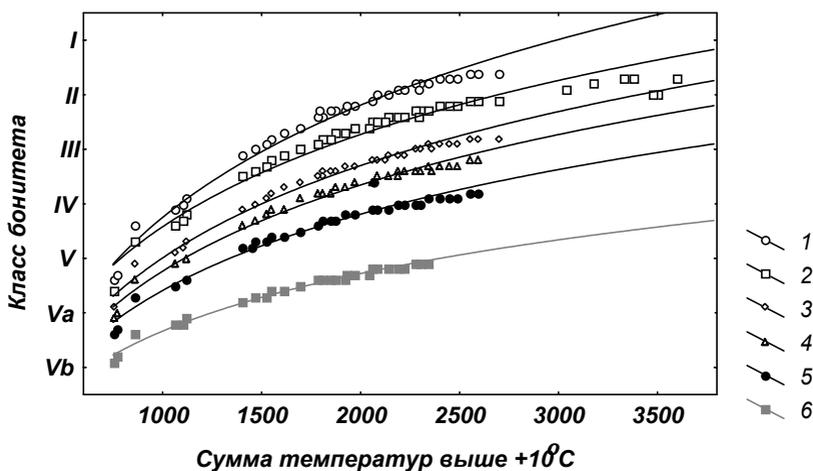


Рис. 1.5. Зависимость производительности сосняков черничного (1), брусничного (2), верескового (3), долгомошного (4), багульникового (5) и сфагнового (6) от суммы температур выше +10 °С

Для перехода от среднегодовой температуры воздуха ( $T_m$ ) к сумме температур выше +10 °С использовалось уравнение

$$\Sigma T_{>10} = 1011 + 196.9 T_m, \quad r = 0.93. \quad (1.15)$$

Уравнение (1.15) получено по данным метеорологических станций севера и северо-запада Европейской части России [185].

Вариации параметров уравнения (1.14) обусловлены некоторой пространственной изменчивостью факторов, влияющих на тип леса и продуктивность древостоя: рельефа места произрастания, гид-

рогеологических условий, водно-физических характеристик почвогрунтов и плодородия почв. В табл. 1.13 приведены регрессионные коэффициенты, полученные для наиболее распространенных на ЕСР типов сосняков, ельников и березняков.

Таблица 1.13

**Коэффициенты регрессии (а) и (b) уравнения (1.14)  
для различных типов леса**

Тип леса	Сосняк		Ельник		Березняк	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Черничный	-17.77	2.97	-18.78	3.10	-12.98	2.39
Брусничный	-14.30	2.44	-15.81	2.58	-12.15	2.26
Вересковый	-14.87	2.44				
Долгомошный	-13.99	2.28	-13.87	2.25	-6.42	1.39
Багульниковый	-12.54	2.02				
Лишайниковый	-10.86	1.80	-12.64	2.00		
Сфагновый	-9.86	1.52	-10.34	1.65	-1.40	0.53

Из (1.14) следует, что изменение класса бонитета при изменении температуры воздуха определяется по уравнению:

$$\Delta K_B = b \ln(\Sigma T_{2 > 10} / \Sigma T_{1 > 10}), \quad (1.16)$$

где  $\Sigma T_{1 > 10}$  и  $\Sigma T_{2 > 10}$  – суммы температур выше +10 °С до и после потепления.

Тесная связь между характеристикой теплообеспеченности и классами бонитета подтверждает сделанный ранее вывод о том, что в пределах лесной зоны изменения интенсивности роста деревьев каждого типа леса зависят в основном от тепловых ресурсов. Используемая нами сумма активных температур выше +10 °С является объективным показателем тепловых условий роста растений [24], поэтому полученные зависимости, по-видимому, могут быть справедливы и для других регионов. Интересно отметить, что для различных пород, произрастающих в Швеции, была получена достаточно тесная зависимость продуктивности древостоя от суммы температур выше 5 °С, которая в работе [240] представлена прямолинейной, что, по-видимому, можно объяснить небольшими изменениями аргумента.

Полученные связи позволяют сделать ряд важных выводов о влиянии тепла на интенсивность роста исследуемых пород древостоя. В большей степени реагируют на колебания температуры почти во всех

рассматриваемых типах ельницы, а в наименьших пределах при изменении температуры воздуха изменяется продуктивность березняков. Реакция на температуру воздуха возрастает у всех пород с улучшением лесорастительных условий: наименьший отклик наблюдается в низкопродуктивных багульниковых и сфагновых типах леса, а наибольший – в черничных и брусничных (см. табл. 1.13). Вид зависимости (1.14) показывает, что температурный градиент бонитета в каждом типе леса снижается с увеличением суммы температур и, следовательно, среднегодовой температуры воздуха.

Таблица 1.14

**Возможные изменения классов бонитета при изменении температуры воздуха ( $\Delta T$ ) в северной и средней подзонах тайги**

Тип леса	$\Delta T$ , °C	Мурманская область			Республика Карелия					
		северная подзона тайги						средняя подзона тайги		
		сосна	ель	береза	сосна	ель	береза	сосна	ель	береза
Черничный	-1	-0.7	-0.8	-0.6	-0.5	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3
	1	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3
	2	1.1	1.1	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6
Брусничный	-1	-0.6	-0.6	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3
	1	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
	2	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
Вересковый	-1	-0.6			-0.4			-0.3		
	1	0.5			0.4			0.3		
	2	0.9			0.7			0.6		
Долгомошный	-1	-0.6	-0.6	-0.3	-0.4	-0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2
	1	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2
	2	0.8	0.8	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3
Багульниковый	-1	-0.5			-0.4			-0.3		
	1	0.4			0.3			0.2		
	2	0.7			0.6			0.5		
Лишайниковый	-1	-0.4	-0.5		-0.3	-0.4		-0.3	-0.3	
	1	0.4	0.4		0.3	0.3		0.2	0.2	
	2	0.7	0.7		0.5	0.6		0.4	0.5	
Сфагновый	-1	-0.4	-0.4	-0.1	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1
	1	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1
	2	0.6	0.6	0.2	0.4	0.5	0.1	0.4	0.4	0.1
Средне-взвешенный*	-1	-0.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3
	1	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
	2	0.9	1.0	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5

Примечание. \*С учетом доли каждого типа леса данной породы.

Значительное влияние температуры воздуха на ширину годовых колец отмечено и в работе [210]. Однако авторы отмечают, что в отдельных регионах и при определенных климатических условиях (в частности, при уменьшении продолжительности вегетационного периода) влияние температуры воздуха может быть отрицательным.

Для основных пород древостоя, произрастающего в Республике Карелия и Мурманской области по (1.16) с учетом (1.15), были рассчитаны изменения классов бонитета при изменении температуры воздуха ( $\Delta T = -1$ ;  $\Delta T = 1$ ;  $\Delta T = 2$ ) (табл. 1.14). Для настоящего времени средняя годовая температура воздуха в таежной зоне Мурманской области принята равной  $-0.6$  °С, в Карелии в северной подзоне тайги  $+1.0$  °С и в средней подзоне  $+2.4$  °С.

В большей степени на изменения температуры воздуха в указанных пределах отреагируют леса северной подзоны тайги Мурманской области. Здесь класс бонитета сосняка черничного и ельника черничного при увеличении среднегодовой температуры воздуха на  $2$  °С возрастет более чем на единицу (см. табл. 1.14). Следует, однако, отметить, что при снижении температуры изменения продуктивности будут происходить в тех же, или даже больших пределах, но с обратным знаком. Наименьшие преобразования при изменении температуры воздуха, как это выше уже отмечалось, будут наблюдаться в низкопродуктивных лишайниковых и сфагновых лесах всех пород.

## 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ И ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ НА ВОДНЫЙ БАЛАНС ТЕРРИТОРИИ

### 2.1. Методологические аспекты оценки преобразования водного баланса в результате деятельности человека в лесу

С появлением в девственном лесу человека, вооруженного лесозаготовительной техникой, начинается новый этап существования и развития данного биогеоценоза. При этом все происходящие с ним изменения в той или иной степени находят отражение в водном балансе. Самые существенные изменения связаны с рубками главного пользования (сплошными) и гидролесомелиорацией. Заметные преобразования водного баланса происходят иногда и после рубок ухода. Преобразования после сплошных рубок и гидролесомелиорации занимают длинный отрезок времени, который в зависимости от интенсивности протекающих процессов, определяющих условия формирования, динамику и соотношения элементов водного баланса, можно разделить на три периода: **период воздействия, переходный и период динамической стабилизации** [84]. Каждый из этих периодов характеризуется определенным видом и интенсивностью преобразовательных процессов, а также величиной (и даже направлением) изменения элементов водного баланса. Поэтому учет временной структуры при гидрологическом исследовании антропогенных факторов необходим, что подчеркивал и Н. И. Коронкевич [95].

В течение **периода воздействия** при рубках главного пользования удаляется практически вся древесная растительность с площади

до 200 га. Это ведет к преобразованию теплового баланса лесного участка и резкому снижению испарения, изменению режима влагозапасов почвогрунтов зоны аэрации и грунтовых вод. Сразу же после окончания сплошных рубок суммарное испарение с данного участка сокращается почти на 50% от величины влагопотребления бывшим лесом.

Снижение испарения с вырубki происходит в основном вследствие удаления деревьев, но некоторый вклад в этот процесс вносит и уничтожение растительности наземного покрова в местах передвижения лесозаготовительной техники (места погрузки древесины и технологические коридоры (волокi)). Кроме изменения испарения на формирование стока влияет и уплотнение верхних горизонтов почвы, особенно на погрузочных площадках и на волоках.

При проведении рубок ухода удаляется только небольшая часть древостоя (до 30–35% от его запаса [135]). Технологические коридоры, где происходят основные нарушения почв и наземного растительного покрова техникой, занимают около 20% площади лесосек. Необходимо отметить, что рубки ухода являются составной частью эксплуатации лесов. Их проведение не ведет к существенным преобразованиям биогеоценоза и процессов, определяющих его функционирование, хотя, несомненно, лес реагирует на вторжение в его жизнедеятельность. Ухудшение водно-физических свойств почвогрунтов может компенсироваться древостоем, как об этом пишет С. Н. Сенов [172], увеличением массы корней и хвои. Об изменении продуктивности древостоя в результате рубок ухода однозначного мнения в литературе нет. Наши расчеты, основанные на опубликованных данных о снижении запаса древесины и отсутствии интенсификации ее прироста, свидетельствуют о снижении транспирации древостоем и испарения задержанных кронами осадков и об увеличении испарения с наземного покрова. В целом эвапотранспирация снижается, и ее сокращение при этом зависит от продуктивности древостоя и начального потребления им влаги, а также от количества вырубленных деревьев. В большинстве случаев снижение не превышает 10–15%, и при отсутствии интенсификации прироста биомассы возрастная динамика испарения не меняется, поэтому его пониженное значение в сравнении с неза-

тронутым рубками лесом сохраняется, как показывают расчеты, в течение нескольких лет. Вместе с тем нельзя исключать того, что возможное увеличение массы корней и хвои должно привести к увеличению влагопотребления и компенсировать снижение испарения.

Следует подчеркнуть, что после рубок промежуточного пользования преобразование элементов теплового и водного баланса происходят в ограниченных и сравнительно узких пределах на фоне последовательных изменений этих элементов, обусловленных естественным развитием лесного биогеоценоза. Это, по нашему мнению, делает выделение периодов развития после рубок ухода не всегда целесообразным, так как не способствует уточнению гидрологических оценок последствий данного вида деятельности человека.

При гидролесомелиорации основное воздействие направлено на изменение режима и запасов почвенно-грунтовых вод. В результате строительства осушительной сети понижается УПГВ и меняется водно-воздушный режим в верхних горизонтах осушаемых почвогрунтов, что отражается на состоянии древостоя и в большей степени в первое время – на состоянии наземного растительного покрова. Происходит угнетение гидрофильных видов растений и начинается перестройка видового состава всей наземной растительности [53, 54], что сопровождается снижением испарения. Понижение УПГВ и уплотнение торфа в образовавшейся зоне аэрации сопровождается сбросом так называемых «вековых» запасов вод в осушительную сеть.

Все вышеизложенное показывает, что результирующим эффектом всего происходящего в лесу в период воздействия как при лесохозяйственных (рубки ухода и гидролесомелиорация), так и при лесопромышленных (рубки главного пользования) работах, с гидрологической точки зрения, является, как правило, снижение испарения и увеличение стока. В наименьшей степени испарение изменяется в этот период при гидролесомелиорации.

Продолжительность периода воздействия данных видов хозяйственной деятельности зависит от объективных и субъективных факторов и чаще всего ограничивается несколькими месяцами и не превышает одного года.

Состояние лесных геокомплексов **в переходный период**, который наступает после воздействия, является наименее устойчивым для конкретных физико-географических условий. В этот период наблюдается интенсификация всех процессов, направленных на возврат данного геокомплекса в старое или переход в новое, отвечающее измененным условиям состояние. Продолжительность этого периода зависит от формы воздействия, окружающей природной среды и вида геокомплекса. Форма воздействия в нашем представлении определяет вероятность возврата геокомплекса к прежнему состоянию [84]. Вероятность его возврата в прежнее состояние связана также с количеством компонентов-реципиентов.

После завершения лесопромышленных работ на вырубке практически не остается элементов хозяйственной деятельности, которые препятствовали бы возврату геокомплекса в прежнее или близкое к нему состояние. Данная форма воздействия определена нами как мягкая [84]. Поскольку основным компонентом-реципиентом является растительность, то о продолжительности переходного периода можно судить по интенсивности лесовосстановления. Заращение древостоем, близким по составу к существовавшему до рубок, может протекать десятилетия, хотя лесовосстановление на значительной части площадей вырубок завершается уже через 10 лет после удаления древостоя [142]. По данным С. С. Зябченко [64], через 10 лет в среднем по Карелии зарастает 81%, а через 15 лет – 91% вырубок. Эти величины близки к возможному, обусловленному природными условиями уровню естественного лесовосстановления [91].

Интенсивность зарастания вырубок определяет интенсивность изменения элементов водного баланса. Наибольшее увеличение суммарного испарения отмечается в первые 5 лет (рис. 2.1). За этот период относительная величина испарения с вырубки (в сравнении с испарением со спелого леса) в среднем возрастает от 45 до 74%, а с 10-летней вырубки испаряется уже около 90% от величины эвапотранспирации со спелого леса. Представленная на рис. 2.1 зависимость построена по опубликованным данным, полученным в различных климатических условиях в пределах лесной зоны, в том числе и в Карелии. В соответствии с ростом испарения происходит последовательное снижение стока с вырубки.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что продолжительность переходного периода при лесопромышленной деятельности можно ограничить 10–15 годами. За эти годы суммарное испарение с вырубki приближается к величине, входящей в интервал ее колебаний, характерных для данных климатических условий.

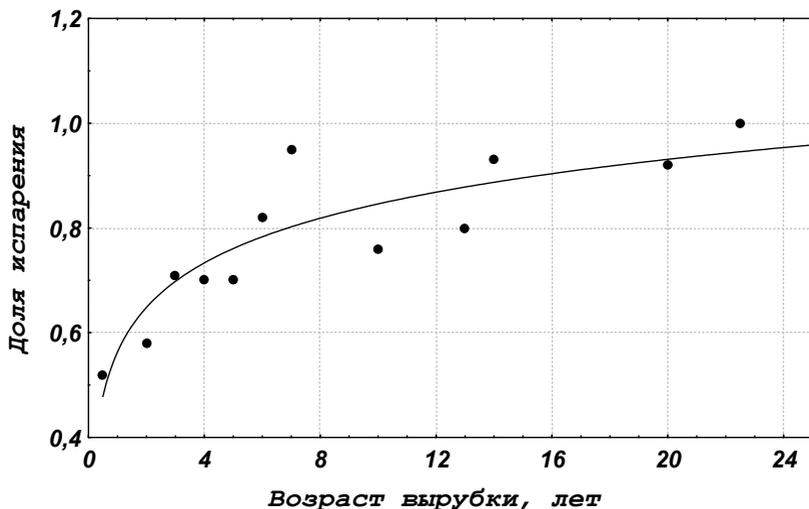


Рис. 2.1. Зависимость относительной величины испарения (относительно спелого леса) от возраста вырубki

При гидролесомелиорации новое состояние геокомплекса закрепляется осушительной сетью каналов и дрен. Основными компонентами-реципиентами при данном виде деятельности, как указано выше, являются грунтовые воды и тесно связанные с ними водовмещающие породы. Происходящие с этими компонентами изменения отражаются на растительном покрове. В переходный период при осушении лесных переувлажненных угодий отмечается уменьшение гидрофильных видов растений и увеличение массы и проективного покрытия видов, присущих суходольным лесам [53, 54, 225]. Происходят изменения, приводящие к увеличению транспирации в древесном ярусе уже в первые годы: отмечается изменение радиационных свойств древесной зелени, увеличивается доля поглощенной солнечной радиации, возрастают интенсивность фотосинтеза и транспирационная активность [93, 121, 153,

180]. В большей степени это проявляется вблизи осушительных каналов. Однако эти выводы в отношении древесного яруса справедливы в полной мере только для молодых деревьев. На естественное снижение интенсивности биологических процессов у старого древостоя улучшение водно-физических свойств почвогрунтов повлиять практически не может. Заметное положительное влияние на прирост древостоя в высоту мелиорация оказывает в том случае, если его возраст, как это показано выше, не больше 80 лет (см. рис. 1.3).

В торфянике на осушаемых болотах и заболоченных лесных участках интенсифицируются микробиологические процессы. Вследствие усиления минерализации органического вещества происходит накопление зольных элементов в поверхностных горизонтах почвы. Продолжающиеся процессы сработки и уплотнения торфа сопровождаются дополнительным сбросом воды в осушительную сеть. Интенсивность и объем этих преобразований зависят в основном от нормы осушения. Изменение наземной растительности и древостоя происходят медленно и растягиваются во времени, поэтому за окончание второго этапа при гидротехнической мелиорации принимают затухание интенсивных преобразований водно-физических характеристик почвогрунтов, обуславливающих достаточно высокий дополнительный сток с болот. Для северных условий продолжительность этого периода ограничивается 3–5 годами [88, 169].

В этот период при осушении молодого древостоя наиболее вероятно некоторое увеличение суммарного испарения, которое будет компенсироваться дополнительным поступлением воды в осушительную сеть из зоны уплотнения торфа, поэтому заметного изменения стока с осушаемого болота в этом случае наблюдаться не будет. При осушении спелого и перестойного древостоя в этот период можно ожидать увеличения стока.

В целом относительная продолжительность периодов воздействия и переходного невелика. Происходящие в это время изменения, часто на сравнительно небольших территориях, почти не влияют на влагооборот крупных бассейнов. С практической точки зрения наибольший интерес вызывает оценка гидрологической роли деятельности человека в лесу в период динамической стабилизации.

Период **динамической стабилизации** начинается после облесения вырубки и образования сомкнутого полога (спустя 10–15 лет после рубок) и в эксплуатируемых лесах продолжается до даты начала новых рубок, отделяемых от предыдущих примерно столетним периодом. В лесах с климатическими условиями, близкими к карельским, в большинстве случаев к этому времени создается самый высокий запас фитомассы и отмечается высокий прирост стволовой древесины [69], что определяет формирование наименьшего стока на залесенных водосборах.

Если по каким-то причинам эксплуатируемый ранее лесной участок исключается из лесопользования, то возникший на вырубке лес может в ходе последовательных сукцессий достичь климаксовой стадии развития – своего наиболее устойчивого состояния. Однако этот процесс развития лесного биогеоценоза может продолжаться несколько столетий [35].

Рост продуктивности молодого и средневозрастного древостоя в результате проведения гидролесомелиорации, начавшийся в переходный период, продолжается в период динамической стабилизации.

По мнению В. М. Медведевой, значительные изменения отмечаются в лесах, осушаемых 50–60 лет [121]. Анализ, выполненный нами, также показал, что достоверную информацию о влиянии гидролесомелиорации на элементы водного баланса можно получить на участках, осушаемых более 10 лет, т. е. в период динамической стабилизации.

Период динамической стабилизации является наиболее продолжительным, поэтому связанные с ним изменения элементов водного баланса представляют наибольший интерес.

Выше было показано, что гидрологическую роль лесов целесообразно оценивать дифференцированно по типам с учетом класса бонитета и возраста. Причем формирование возрастной динамики и структуры производного леса рассматривается только после рубок, хотя принципиальной разницы по подходу к оценке влияния на гидрологические и гидрофизические процессы между всеми катастрофическими для леса факторами (рубки, ветровалы, массовое размножение вредителей, пожары и т. д.) практически нет.

Каждый тип коренного леса конкретного бонитета представляет собой однородный по условиям формирования элементов водного баланса участок. В производных лесах на однородность условий формирования водного баланса оказывает влияние возраст древостоя, поэтому в данном случае в качестве однородного можно рассматривать участок, представленный однотипным, однобонитетным и одновозрастным лесом.

Следует отметить, что с учетом типизации лесов южной подзоны тайги А. А. Книзе и О. И. Крестовский [92] исследовали влияние структуры лесного фонда на водность рек. В работе [86] типизация лесной растительности использовалась при оценке изменения испарения с лесов Восточной Финноскандии под влиянием изменения климата. На этой же методологической основе оценивалось изменение элементов водного баланса в результате гидролесомелиорации [90]. Однако возможность использования средне-многолетнего значения испарения с леса конкретного возраста (существующего один год) вызывает сомнение, и поэтому ниже приведены дополнительные обоснования.

Испарение с леса можно рассматривать как случайную функцию от времени, так как его изменения во времени происходят под влиянием многих факторов, которые, учитывая природу их происхождения, можно принимать за случайные. К основным из таких факторов относятся колебание погодных условий, изменение интенсивности биологических процессов в зависимости от погоды и возраста деревьев, пространственное распределение различных по возрасту и продуктивности деревьев, пространственное распределение продуктивности почвы и др. Данный вывод не противоречит определению случайной функции, которое, используя обычно применяемые обозначения, можно представить в следующем виде [68]:

$$X(t) = \varphi(t, \omega), \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T, \quad X(t) \in \Xi, \quad (2.1)$$

где  $X(t)$  – случайная функция двух аргументов – времени  $t$  и элементарного события  $\omega$ ;  $\Omega$  – пространство элементарных событий  $\omega$ , образующих множество;  $T$  – множество значений времени  $t$ , являющегося аргументом случайной функции  $X(t)$ ;  $\Xi$  – множество возможных значений случайной функции.

Основными факторами, определяющими пространственную изменчивость испарения коренным лесом в конкретных климатиче-

ских условиях, как это следует из раздела 1.3, являются условия произрастания и продуктивность древостоя (тип леса и бонитет), для производного леса к таким факторам относится и возраст древостоя.

Для удобства обобщения значений испарения лесной фонд, относящийся к определенному району с однородными климатическими условиями, следует рассматривать как множество, элементами которого являются участки, в частности, коренного леса, одного и того же типа и класса бонитета. Рассчитанное за интервал времени испарение для участка конкретного типа леса и класса бонитета можно представить как реализацию случайной функции. При оценке влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы интерес представляют среднемноголетние значения элементов водного баланса. Для коренного леса, где временная устойчивость возрастного и породного состава обуславливает устойчивость условий формирования элементов водного баланса, усредненная за ряд лет для каждого типа и класса бонитета величина представляет собой среднее для каждой реализации испарение.

Формирование годовых величин элементов водного баланса на участках конкретного бонитета и типа коренного леса можно рассматривать как стационарные случайные процессы, обладающие эргодическими свойствами [68]. В этом случае средние величины испарения и стока могут быть получены не только по одной реализации (по одному участку леса) за достаточно продолжительный отрезок времени, но и при осреднении по многим расположенным в одинаковых климатических условиях участкам (реализациям) одного и того же типа и класса бонитета.

В производных лесах, большая часть которых эксплуатируется, интенсивность и пределы изменений биометрических характеристик древостоя в период лесовосстановления также являются функцией типа леса и класса бонитета, поэтому реализации элементов водного баланса в однотипных одновозрастных и однобонитетных лесах, расположенных в одинаковых физико-географических условиях, также обладают свойством эргодичности. Поэтому среднемноголетнее значение испарения конкретного возраста может быть определено по различным выборкам (различным участкам). Такое представление придает «легитимность» понятию

среднемноголетнего значения элемента водного баланса производного леса конкретного возраста и позволяет определить это значение.

## **2.2. Методы оценки влияния различных рубок на элементы водного баланса**

Леса, где ведется заготовка древесины, характеризуются, как отмечалось выше, интенсивным в первые пять лет после рубок и достаточно плавным в последующие годы преобразованием состава и свойств растительного покрова, что обуславливает аналогичную динамику элементов водного баланса. Кроме того, на возрастную динамику элементов водного баланса могут накладываться изменения, вызванные рубками ухода. Однако в силу их мелкомасштабности по доле вырубемого запаса и по площади проведения (см. табл. 1.3, а в последние годы, в частности в Карелии, площадь, затронутая рубками ухода, составляет менее 0.5% от лесопокрытой площади) эти изменения часто играют незначительную роль в колебаниях водных ресурсов на фоне естественных преобразований стокоформирующих факторов. По-видимому, этим объясняется отсутствие внимания со стороны гидрологов, занимающихся лесной гидрологией и хозяйственной деятельностью в лесу, к рубкам ухода. Немаловажным объяснением такой «невнимательности» гидрологов может служить и сложность сбора необходимой для выполнения таких работ информации для конкретного водосбора.

Для оценки изменения среднемноголетней величины годового стока в результате различных рубок предлагается равенство, основанное на решении составленных для условий до рубок и после их проведения уравнений водного баланса:

$$dY_{i\tau} = Y_{sl_{i\tau}} - Y_{fi} = -dE_{i\tau} + dY_{s_{i\tau}} = (-E_{sl_{i\tau}} + E_{fi}) + dY_{s_{i\tau}}, \quad (2.2)$$

где  $dY_{i\tau}$  и  $dE_{i\tau}$  – изменение стока и испарения  $i$ -той лесосеки спустя  $\tau$  лет после рубки, мм;  $Y_{sl_{i\tau}}$  и  $E_{sl_{i\tau}}$  – сток и испарение с  $i$ -той вырубке возраста  $\tau$ , мм;  $Y_{fi}$  и  $E_{fi}$  – сток и испарение с  $i$ -той лесосеки до рубки деревьев, мм;  $dY_{s_{i\tau}}$  – дополнительный сток, вызванный изменением водно-физических свойств почвогрунтов, спустя  $\tau$  лет после рубок.

В уравнении (2.2) имеется в виду, что динамика испарения после рубок характеризует все происходящие в лесу процессы, природного и антропогенного происхождения. При оценивании изменения стока по (2.2) величина осадков принимается одинаковой и равной климатической норме как для покрытого древесной растительностью участка, так и для вырубки. Это допущение оправдывается тем, что, по мнению С. Ф. Федорова [194], увеличение годовой суммы осадков лесом по сравнению с лугом составляет всего 5%. Вместе с тем исследования С. Ф. Федорова [194], а также наши [87] показали, что количество осадков на поляне или на вырубке зависит от размера лишенного древостоя участка. Все это порождает значительные сложности при учете изменения осадков над рубками в гидрологических расчетах, так как при этом нужно еще учитывать влияние на антропогенную составляющую осадков динамику зарастания вырубки со всем многообразием путей лесовосстановления. По нашему мнению, такое усложнение расчетов не приведет к повышению точности оценки изменения стока. Кроме того, существует еще один важный аргумент в пользу более простого подхода к оценке. Разница в осадках объясняется усилением турбулентности воздушного потока над лесом за счет повышенной шероховатости залесенной местности. На исследуемой территории, особенно в Карелии и на Кольском полуострове, в большинстве случаев определяющее влияние на шероховатость местности оказывает рельеф. Поэтому удаление древесной растительности здесь со сравнительно небольшой площади при сплошных рубках может не повлиять на кинематику воздушного потока.

Для всего водосбора, на котором имеются несколько разновозрастных рубок, а доли площади каждой вырубки равны  $f_i$ , изменение стока составит

$$dY = \sum (-dE_{i\tau} + dY_{s i\tau}) f_i. \quad (2.3)$$

При решении целенаправленных задач по исследованию влияния рубок промежуточного пользования на испарение и сток исходное (до рубок) значение испарения определяется для того участка производного леса, где выполняются эти работы, до их выполнения. Таксационные характеристики древостоя после рубок определяются с учетом проведенных работ. Оценка изменения стока может быть получена также по (2.2) и (2.3).

Оценкой влияния рубок главного пользования, проводимых в производных лесах, на испарение и сток является разница между их исходными величинами и величинами, полученными для каждого конкретного возраста в период развития леса после рубок. Начальные значения элементов водного баланса для леса определяются, как правило, для момента, предшествующего рубкам. Чаще всего данный участок эксплуатируется уже многие годы и даже десятилетия, поэтому формирование состава и структуры древостоя произошло под влиянием деятельности человека. Возраст коренных лесов составляет 300 и более лет [35], следовательно, перестройка достигнутого возраста рубки производного леса с соответствующим преобразованием водного баланса при «благоприятных» условиях будет продолжаться более 200 лет. Поэтому полученная оценка для каждого типа и класса бонитета производного леса будет зависеть не только от возраста восстанавливаемого леса, но и вырубленного. При таких условиях ее нельзя принимать в качестве объективного показателя роли человека в преобразовании водного баланса лесного водосбора. Данная оценка показывает произошедшее изменение относительно гидрологических условий, характерных для спелого производного леса, поэтому ее можно принимать как **относительную**. Нужно отметить, что основной объем древесины заготавливают в производных лесах, которые занимают большую часть освоенной территории таежной зоны ЕСР, поэтому **относительная оценка** представляет наибольший интерес при решении различных водохозяйственных задач.

Если заготовка древесины выполняется в коренном лесу, то при оценке влияния этого вида деятельности на испарение и сток рассчитывается разница между их исходными величинами, полученными для конкретного коренного леса (или другого коренного леса того же типа и класса бонитета, что и вырубаемый), и величинами, вычисленными для каждого конкретного возраста в период развития леса после рубок. Такую оценку мы предлагаем называть **абсолютной**.

Сложность получения такой оценки заключается в том, что для многих типов коренных лесов отсутствуют таксационные описания, позволяющие вычислять входящие в расчетные уравнения параметры. Расчеты, выполненные нами ранее, свидетельствуют о

близости значения суммарного испарения с перестойных эксплуатируемых сосняка брусничного и ельника черничного и с коренных лесов соответствующих типов [19]. Такой результат согласуется с возрастным распределением запасов древесины в коренных лесах, где преобладают древостои в возрасте более 200 лет, и, по-видимому, близость значений суммарного испарения с перестойных производных и коренных лесов характерна и для остальных типов.

В работах О. И. Крестовского динамика стока с водосборов в период лесовосстановления рассматривается по отношению к среднерайонной величине (норме) [98]. Однако для водосборов, покрытых производными лесами, этот подход является не совсем удобным, так как на таких водосборах норма стока зависит не только от климатических факторов, но и от изменчивости по годам расчетной лесосеки в данном регионе, что определяет преобразование возрастной структуры лесного фонда, а, следовательно, и вариацию стока.

### **2.3. Методы оценки влияния гидролесомелиорации на элементы водного баланса**

#### **2.3.1. Расчет изменения годового стока с болота и речного водосбора из-за гидролесомелиорации**

Получить количественную оценку изменения стока после гидролесомелиорации можно, основываясь на уравнениях водного баланса до и после выполнения мелиоративных работ.

Величина усредненного за многолетний период годового стока с болота и заболоченного леса в объемных единицах до осушения определяется по уравнению:

$$V_b = 10^3 F_b (P + Y_{tr} + U_{hor} - E_b - U_{vb}), \quad (2.4)$$

где  $V_b$  – результирующая величина стока из торфяной залежи, м<sup>3</sup>;  $F_b$  – площадь осушаемого участка, км<sup>2</sup>;  $P$  – осадки, выпадающие на осушаемый участок, мм;  $Y_{tr}$  – поверхностный приток на болото, мм;  $U_{hor}$  – подземный боковой приток на болото, мм;  $E_b$  – испарение с исследуемой территории до осушения, мм;  $U_{vb}$  – вертикальный подземный водообмен через дно болота до его осушения, мм.

После проведения мелиоративных работ уравнение водного баланса преобразуется за счет появления дополнительного стока непосредственно с осушаемого участка и с прилегающей территории и изменения остальных элементов. Для этого случая сток с осушаемого болота и его водосбора определяется по следующему уравнению:

$$V_{db\tau} = 10^3 F_b (P + Y_{tr} + U_{hor} + U_{ch\tau} - E_{db\tau} - U_{vdb\tau} + Y_{bp\tau}) + 10^3 F_{ls} Y_{ls\tau} \quad (2.5)$$

где  $V_{db\tau}$  – сток спустя  $\tau$  лет после мелиорации,  $m^3$ ;  $E_{db\tau}$  и  $U_{vdb\tau}$  – испарение и подземный водообмен спустя  $\tau$  лет после проведения мелиоративных работ, мм;  $U_{ch\tau}$  – дополнительный приток грунтовых вод в осушительную сеть при ее заглублении в подстилающие торфяник водоносные горизонты после  $\tau$  лет осушения, мм;  $Y_{bp\tau}$  – величина дополнительного стока непосредственно с осушаемого болота, обусловленная снижением УПГВ, понижением поверхности болота и уплотнением торфяника спустя  $\tau$  лет после начала осушения, мм;  $Y_{ls\tau}$  – слой сработки грунтовых вод на смежной территории при понижении УПГВ на осушаемом участке спустя  $\tau$  лет после начала осушения, мм;  $F_{ls}$  – площадь смежной с осушаемым участком территории, на которой отмечается снижение уровня грунтовых вод (УГВ).

В уравнениях (2.4) и (2.5) осадки принимаются одинаковыми как для осушаемых, так и неосушенных площадей, допустимость чего подтверждена рядом работ, в том числе и исследованиями О. Г. Сорочан [182]. Для климатических условий исследуемой территории снижение УГВ на прилегающей к болоту местности практически не отражается на величине суммарного испарения, поэтому как поверхностный, так и подземный приток на болото после его осушения можно принимать постоянным. Изменение стока с осушаемого переувлажненного участка в этом случае будет равно:

$$dV_{\tau} = 10^3 (F_b (U_{ch\tau} - E_{db\tau} + E_b - U_{vdb\tau} + U_{vb} + Y_{bp\tau}) + F_{ls} Y_{ls\tau}) = 10^3 (F_b (dE_{\tau} + U_{ch\tau} + dU_{\tau} + Y_{bp\tau}) + F_{ls} Y_{ls\tau}), \quad (2.6)$$

где  $dV_{\tau}$  – разница между объемами стока с болота или заболоченного леса после  $\tau$  лет мелиорации и до мелиорации,  $m^3$ ;  $dE_{\tau}$  и  $dU_{\tau}$  – разница между величинами испарения и подземного водообмена до и после  $\tau$  лет мелиорации, мм.

Для оценки изменения стока с речных водосборов результаты расчета по (2.6) удобнее представлять в мм слоя, разделив правую часть на площадь водосбора. После соответствующих преобразований получаем уравнение:

$$dY_{\tau} = f_b(dE_{\tau} + U_{ch\tau} + dU_{\tau} + Y_{bp\tau}) + f_{ls}Y_{ls\tau} \quad (2.6')$$

где  $f_b$  и  $f_{ls}$  – соответственно доли осушаемого болота и смежной с ним территории, на которой произошло понижение УГВ.

Величины  $dU_{\tau}$  и  $U_{ch\tau}$  влияют на изменение стока непосредственно с болота и малых с небольшой врезанностью русел рек, на водосборах которых располагается осушаемое болото. Для достаточно крупных рек с замкнутыми водосборами изменение стока рассчитывается по следующему уравнению:

$$dY_{\tau} = f_b(dE_{\tau} + Y_{bp\tau}) + f_{ls} Y_{ls\tau} \quad (2.7)$$

Наши оценки показали, что в условиях Карелии площади осушаемого для сельскохозяйственных целей болота и зоны его влияния на окружающей территории можно с некоторой долей погрешности принимать равными [89]. О соизмеримости этих площадей в условиях Белоруссии отмечалось в [211]. В. Ф. Шебеко, основываясь на своем огромном опыте, пришла к выводу, что использование метода аналогов дает более надежные результаты, чем существующие расчетные методы [211]. Правда, ее вывод относился к проблеме определения ширины зоны влияния осушаемого болота, но так как этот параметр является основным при определении площади, то данный вывод можно использовать более широко. Следует отметить, что равенство площадей принималось С. М. Новиковым и Ж. С. Гончаровой при составлении прогноза изменений водных ресурсов крупных рек СССР под влиянием осушительных мелиораций [140]. Для условий, когда площади осушаемого болота и зоны влияния равны между собой, уравнения (2.6') и (2.7) можно представить в следующем виде:

$$dY_{\tau} = f_b(dE_{\tau} + U_{ch\tau} + dU_{\tau} + Y_{bp\tau} + Y_{ls\tau}), \quad (2.6'')$$

$$dY_{\tau} = f_b(dE_{\tau} + Y_{bp\tau} + Y_{ls\tau}). \quad (2.7)$$

Критическую площадь бассейнов, разделяющую их на малые с незамкнутым водным балансом и на большие, можно установить, анализируя зависимости стока от площади водосбора, так как для малых рек характерно отличие их стока от зонального. По величине минимального стока А. В. Владимиров [31] предлагает

относить к малым все реки, модуль минимального стока которых зависит от площади бассейна и возрастает с увеличением последнего. С учетом этого критерия для большей части территории ЕСР к малым А. В. Владимиров относит реки с площадями бассейнов менее 1200–1500 км<sup>2</sup> [31]. Очевидно, что особенности взаимосвязей глубоких горизонтов подземных вод с речными влияют на пространственные вариации годового стока рек в меньшей степени, чем минимального. Поэтому величина критической площади бассейнов, выше которой практически не наблюдается увеличение годового стока с ростом дренированности, может быть значительно меньшей. Этот вывод в наибольшей степени относится к зоне достаточного увлажнения. А. М. Владимиров также отмечает, что полное дренирование водоносных горизонтов происходит в диапазоне площадей водосборов от 100 до 200 км<sup>2</sup> [31]. Отсутствие влияния глубины врезанности русла на сток с водосборов, превышающих по размеру 200 км<sup>2</sup>, отмечал для финских рек П. Сеуна [245].

На рис. 2.2 приведена зависимость модуля стока рек Карелии от площади водосбора. На этом графике наибольший разброс точек наблюдается в диапазоне площадей 0–30 км<sup>2</sup>. Для рек с большей площадью водосборов врезанность русла обеспечивает полный приток грунтовых вод, характерный для данной местности. Благодаря этому сток с их водосборов соответствует климатическому. Кроме того, на крупных водосборах доля стока с площадей, заключенных между подземными ( $F_{un}$ ) и поверхностными ( $F_{sur}$ ) водосборами, значительно ниже, чем на малых. Это обеспечивает уменьшение пространственной вариации стока таких рек, вызванной частично колебаниями разницы ( $F_{un} - F_{sur}$ ) на малых водосборах. Для Новгородской области, по данным наблюдений на водосборах Валдайского филиала ГГИ, О. И. Крестовским было установлено, что величина площади, с которой наступает стабилизация модуля стока, близка к карельской и равна 50 км<sup>2</sup> [100].

Если на основании изложенного принять, что на территории ЕСР при  $F > 30\text{--}50$  км<sup>2</sup> увеличение глубины русла не вызывает заметного дополнительного грунтового притока и доля стока с возможной площади ( $F_{un} - F_{sur}$ ) при данных геоморфологических и гидрогеологических условиях невелика, то при сооружении осушительной сети на болотах часто можно ожидать увеличения стока в Карелии на реках с  $F < 30$  км<sup>2</sup>.

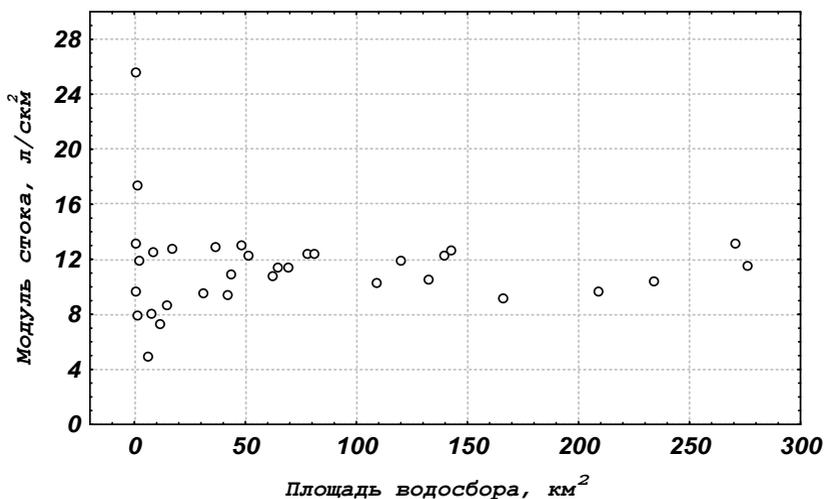


Рис. 2.2. Зависимость модуля стока рек Карелии от площади водосбора

Предложенная выше величина критической площади подтверждается и воднобалансовыми расчетами для бассейнов некоторых рек Карелии. Так, например, расчеты для реки Томицы ( $F = 30.5 \text{ км}^2$ ,  $f_{oc} = 15\%$ ) [5] свидетельствуют об отсутствии заметного влияния на элементы водного баланса дополнительного притока (стока) при наличии значительного притока (более 100 мм в отдельные годы) к осушаемому торфянику «Вилга», лежащему в бассейне этой реки [6]. В то же время, дополнительный годовой приток грунтовых вод к водосборам рек Ревзеня ( $F = 16.4 \text{ км}^2$ ) и Алганоя ( $F = 14.5 \text{ км}^2$ ), включающим осушенные участки Корзинской низины, по нашим расчетам составляет в среднем за многолетний период соответственно 87 и 53 мм.

В заключение необходимо упомянуть об утверждении Д. Л. Соколовского о том, что в зоне достаточного увлажнения только на стоке очень малых рек возможно проявление неполноты врезанности их русел [181].

Таким образом, при оценке изменения годового стока в результате гидротехнической мелиорации по данным наблюдений на малых реках (для ЕСР  $F < 30\text{--}50 \text{ км}^2$ ) статистическими методами или методами активного эксперимента следует иметь в виду, что полученные результаты можно использовать только в схожих физико-

географических условиях и для таких же по размеру рек. Кроме того, нужно учитывать, что даже после окончания переходного периода может продолжаться понижение поверхности торфяника, как это происходит на осушаемом для сельскохозяйственных целей болоте [89], и, следовательно, поступление дополнительного стока. Учет динамики постмелиоративных изменений в стоке в полной мере возможен при использовании формулы (2.6<sup>1</sup>) для рек с площадью водосборов менее 30–50 км<sup>2</sup> и формулы (2.7<sup>1</sup>) для рек с площадью водосборов более 30–50 км<sup>2</sup>.

Малым рекам в силу их многочисленности и уязвимости при антропогенной нагрузке уделяется большое внимание. При этом в настоящее время используют различные подходы к их выделению, что создает сложности при применении информации, полученной в различных регионах [2]. В этой связи наиболее оправданным является подход, указанный выше. Использование степени влияния азональных факторов на сток в качестве критерия выделения малых водосборов предлагается и в работе А. Г. Косицкого [97].

### 2.3.2. Расчет дополнительного стока с осушаемой и смежной территорией

Впервые приближенная оценка дополнительного стока, образовавшегося в результате гидротехнической мелиорации с осушаемого торфяника ( $Y_{bp}$ ) и прилегающей территории ( $Y_{ls}$ ), была выполнена С. М. Новиковым и Ж. С. Гончаровой [140], в основном по данным наблюдений на болотах Белоруссии, осушенных для сельскохозяйственного использования. Эта оценка учитывалась при составлении ими предварительного прогноза возможных изменений стока после проведения гидромелиоративных работ для крупных рек СССР. В последние годы несколько уточненным методом была получена оценка динамики дополнительного стока с освоенного и используемого для выращивания многолетних трав болота Карелии за многолетний период [89].

Величина стока  $Y_{bp}$  определяется как сумма водоотдачи из осушаемого слоя при понижении УПГВ ( $dY_z$ ) и количества воды, содержащейся в слое осадки и сработки торфяной залежи ( $dY_{дн}$ ) [140]:

$$Y_{bp} = dY_z + dY_{дн}. \quad (2.8)$$

Слой воды, сбрасываемый из осушаемого слоя почвогрунтов, рассчитывается по разности:

$$dY_z = Y_{nb} - Y_d, \quad (2.9)$$

где  $Y_{nb}$  – количество влаги почвогрунтов в слое, высота которого равна разности среднегодовых УПГВ до осушения и после, мм;  $Y_d$  – количество влаги в том же слое после мелиорации, мм.

Влагозапасы в осушаемом слое до мелиорации соответствуют полной влагоемкости, поэтому для определения  $Y_{nb}$  используется уравнение:

$$Y_{nb} = 0.1 W_{fv\%} \Delta Z, \quad (2.10)$$

где  $W_{fv\%}$  – величина полной влагоемкости почвогрунтов в слое осушения в % от объема;  $\Delta Z$  – разность среднегодовых УПГВ до осушения и после, см.

Изменение влаги по высоте в слое осушения над УПГВ зависит от метеорологических факторов и капиллярных сил. Для данных расчетов распределение влаги в зоне аэрации можно принять равновесным, которое определяется действием только капиллярных сил. При определении среднегодовых значений это соответствует реальным условиям, так как снижение запасов влаги по отношению к равновесному в летний период в верхних горизонтах почвогрунтов компенсируется превышением их в зимний и весенний сезоны, поэтому значение  $Y_d$  для торфяника можно вычислять по уравнению [88]:

$$Y_d = (W_{fv\%} / 0.012)(1 - \exp(-0.0012 \Delta Z)). \quad (2.11)$$

Для минеральных почвогрунтов значение  $Y_d$  определяется по следующему уравнению [88]:

$$Y_d = 0.1 \Delta Z (W_{fv\%} - \Delta Z \mu_w\% / 2Z_k), \quad (2.12)$$

где  $\mu_w\%$  – коэффициент водоотдачи, %;  $Z_k$  – высота капиллярного поднятия, см.

Слой воды, образующий дополнительный сток с болота из слоя осадки и сработки торфа, определяется по уравнению:

$$dY_{dH} = 10 dH_p W\%, \quad (2.13)$$

где  $dH_p$  – величина осадки и сработки торфяной залежи, м;  $W\%$  – влагозапасы в слое осадки и сработки, в % от объема.

Ориентировочно величину  $dH_p$  принимают равной 10–15% от глубины канала для плотного торфа и 30–40% – для рыхлого торфа [124]. Следует отметить, что существующие методы расчета осадки торфа предназначены для тех случаев, когда осушение

выполняется для сельскохозяйственных целей. Для гидроресомелиорации, вследствие особенностей ее проведения, расчеты по существующим уравнениям [124] дают завышенные результаты.

Слой стока при понижении УГВ на смежной с осушаемым болотом территории равен произведению осредненной величины сработки уровня ( $dZ_{ls}$ ) на коэффициент водоотдачи ( $\mu_w$ ):

$$Y_{ls} = \mu_w dZ_{ls}. \quad (2.14)$$

Снижение уровня грунтовых вод на прилегающей территории ( $dZ_{ls}$ ) зависит от понижения УГВ в створе ловчего канала или глубины заложения дрен, от рельефа и водно-физических свойств водовмещающих грунтов. Для расчета этой величины на любом расстоянии  $x$  от ловчего канала по результатам исследования в Белоруссии предложено много формул. Некоторые из них, не учитывающие гидрогеологические характеристики местности, могут использоваться только в условиях, близких к тем, где они были получены, различия между другими заключаются в степени учета влияния коэффициента уровнепроводности [114]. Наибольшее распространение получила формула, предложенная С. Ф. Аверьяновым [117]:

$$dZ_{lsx} = dZ_{l0} \operatorname{erfc}(z), \quad (2.15)$$

где  $\operatorname{erfc}(z)$  – функция параметра  $z$ ;  $dZ_{l0}$  – понижение УГВ в створе ловчего канала, м.

При определении  $dZ_{lsx}$  для конкретного расстояния от границы осушаемого болота (ловчего канала) дальность действия осушительной системы на смежной территории следует принимать, основываясь на расчетах и эмпирических данных [211]. Осредненная величина ширины зоны влияния составляет 1.2–1.5 км [117], но в благоприятных случаях это расстояние может превышать 3 км [114]. По мнению В. Ф. Шебеко, в зависимости от гидрогеологических условий исследуемой территории и снижения УПГВ на болоте ее следует принимать в пределах от 0.5 до 4.0 км.

Параметр  $z$  определяется по формуле:

$$z = x / (2(a t)^{0.5}), \quad (2.16)$$

где  $a$  – коэффициент уровнепроводности, м<sup>2</sup>/сут;  $x$  – расстояние от ловчего канала до расчетного места, м;  $t$  – продолжительность развития кривой депрессии на прилегающей территории, сут.

При изменении  $z$  от 0 до 2 значение функции  $\operatorname{erfc}(z)$  уменьшается от 1 до 0.0047. Для его определения предложены таблицы [117].

Для приближенной оценки функции  $erfc(z)$  можно использовать аппроксимирующее табличные значения выражение:

$$erfc(z) = -0.11 + 0.61 \exp(0.63 - 1.36z). \quad (2.17)$$

Коэффициент уровнепроводности вычисляется по известному соотношению:

$$a = k_f h_{gwm} / \mu_w, \quad (2.18)$$

где  $k_f$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $h_{gwm}$  – средняя по пласту и времени мощность грунтовых вод.

Коэффициент фильтрации можно принимать из обобщенных для различных условий данных. Это значение для разнородных моренных песков с включениями гальки, гравия и валунов составляет 10–15 м/сут, в мелкозернистых и среднезернистых песках он изменяется от 0.2 до 6 м/сут, в супесях – от 0.1 до 0.01 м/сут, в суглинках – от 0.004 до 0.1 и в ленточных глинах – от 0.001 до 0.05 [138].

Коэффициент водоотдачи зависит от вида грунтов и их гранулометрического состава. Для приближенных расчетов используются обобщенные для различных грунтов значения, которые изменяются от 0.25–0.35 для крупнозернистых и гравелистых песков до 0.01–0.06 для тяжелых суглинков и глин [33, 124, 125]. В работе [140] значение коэффициента водоотдачи принято равным 0.2, что соответствует песчаным и супесчаным грунтам. При наличии данных наблюдений за стоком в ловчем канале и за уровнем грунтовых вод, дренируемых этим каналом, средний коэффициент водоотдачи может быть определен по формуле:

$$\mu_w = Y_{lc} / dZ_c, \quad (2.19)$$

где  $Y_{lc}$  – величина стока воды в ловчем канале, соответствующая суммарному подземному притоку, мм;  $dZ_c$  – понижение УГВ на водосборе, происходящее только за счет стока в дренирующую сеть, мм.

### 2.3.3. Методы оценки изменения суммарного испарения с болота и заболоченного леса после проведения гидротехнической мелиорации

Изменение суммарного испарения под влиянием гидроресомелиорации заболоченного леса или залесенного болота определяется по уравнению:

$$dE_\tau = E_b - E_{db\tau} = dE_{i\tau} + dE_{i\tau} + dE_{s\tau}, \quad (2.20)$$

где  $dE_{i\tau}$ ,  $dE_{i\tau}$  и  $dE_{s\tau}$  – разница транспирации древостоем, испарения

осадков с полога леса и испарения с наземного покрова до и после  $\tau$  лет мелиорации.

Эффективность гидролесомелиорации оценивается изменением интенсивности роста и развития древостоя, а эти определяющие интенсивность испарения с леса процессы зависят в большой степени от возраста леса и продолжительности его осушения. Поскольку рост переувлажненного леса продолжался бы, хотя и с меньшей интенсивностью, и без вмешательства человека, то объективную оценку гидрологической роли мелиорации можно получить только при сравнении величин составных частей суммарного испарения с осушенного и неосушенного леса одинакового возраста. Это необходимо, конечно, только для тех случаев, когда неосушенные заболоченные леса эксплуатировались. При этом таксационные характеристики леса после мелиорации определяются в поле, а для случая, если бы лес оставался в естественном, ненарушенном состоянии, возрастные изменения его таксационных характеристик могут быть установлены по таблицам М. М. Орлова [108] или по региональным таблицам [107]. Следует отметить, что в спелых эксплуатируемых лесах изменения таксационных характеристик в естественном состоянии практически не происходят, поэтому при оценке преобразования испарения в результате осушения определение массы листвы и листового индекса допускается выполнять по наблюдаемым до осушения значениям средней высоты древостоя и запаса стволовой древесины.

Для безлесных или слабооблесенных болот испарение с них до проведения мелиоративных работ при отсутствии наблюдений определяется по методу В. В. Романова, изложенному в [160]. После облесения осушаемых болот испарение можно определять по изложенному в главе 3 методу при наличии таксационных характеристик появившегося древостоя.

Для водосборов, на которых гидролесомелиорация проводилась на различных типах болот и лесов, изменения испарения и стока рассчитываются дифференцированно. Величина изменения, как испарения, так и стока в целом с водосбора определяется с учетом доли каждого типа осушаемых объектов:

$$dE = \sum dE_i f_i, \quad (2.21)$$

где  $dE_i$  – изменение испарения с  $i$ -го болота после осушения, мм;  
 $f_i$  – доля площади  $i$ -го болота на водосборе.

### 3. РАСЧЕТ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С ЛЕСА

При решении различного рода гидрологических задач для зеленой местности наибольшую проблему представляет определение испарения с леса. Это связано с тем, что лес представляет собой сложный объект, включающий различный по породному составу, возрасту и продуктивности древостой, а также различную по видовому составу растительность наземного покрова. Все это многообразие растительного покрова и всевозможные его преобразования, происходящие как естественным путем, так и в результате хозяйственной деятельности, непосредственно отражаются на испарении. Достаточно подробный перечень применяемых в практике в настоящее время в России и за рубежом методов определения испарения с леса приведен в [32, 125, 160]. Их основным недостатком является то, что в большинстве из доведенных до практического использования методов почти не учитывается многообразие лесов, описываемое биометрическими и биофизическими характеристиками. Применение существующих ныне моделей испарения, где при определении транспирации древостоем подробно учитываются его влияющие на водопотребление характеристики [22, 187, 221, 223, 234, 239 и др.], предполагает наличие достаточно большого объема информации о растительном покрове и о метеорологических условиях в лесу. К сожалению, в настоящее время при решении практических задач получение этого материала часто связано с непреодолимыми трудностями.

В нашей стране для определения испарения с леса рекомендуется и до последнего времени широко используется метод,

основанный на зависимости относительной величины испарения с леса от радиационного индекса сухости [125, 160]. Однако и в нем из всех особенностей лесов, влияющих на формирование элементов водного баланса, учитывается только породный состав. Это исключает применение данного метода для гидрологических оценок хозяйственной деятельности в лесу (гидролесомелиорации, рубок ухода и главного пользования), которая приводит к образованию определенного цикла развития леса, характеризующегося изменением видов растительного покрова, возраста древостоя и запасов фитомассы.

При решении задач, связанных с исследованием влияния хозяйственной деятельности на гидрологические процессы в лесу, наиболее целесообразным является дифференцированный подход к рассмотрению испарения различными элементами леса, что позволяет учесть влияние на влагооборот особенностей их развития. В этом случае эвапотранспирация представляется в виде суммы трех слагаемых [92, 98, 194 и др.]:

$$E = E_t + E_i + E_s, \quad (3.1)$$

где  $E_t$  – транспирация древостоя;  $E_i$  – испарение задержанных пологом леса атмосферных осадков;  $E_s$  – испарение с наземного покрова.

Уравнение (3.1) позволяет учитывать влияние на испарение разнообразия таксационных характеристик древостоя в различных типах леса и возрастные изменения растительного покрова в эксплуатируемых лесах. Все применяемые в настоящее время для определения слагаемых этого уравнения методы в зависимости от временного шага можно разделить на две группы: 1) расчет испарения за сутки и более короткие интервалы времени [187, 223, 234 и др.] и 2) расчет сезонных и годовых величин испарения [90, 92, 98 и др.]. Такое разделение определяет и необходимый объем информационной базы. Удлинение временного шага позволяет обойтись меньшим количеством более доступных материалов, в то время как использование моделей с короткими временными шагами ограничивается в настоящее время возможностями получения необходимой для расчетов информации, что естественно сдерживает применение их для решения практических задач.

### 3.1. Транспирация древостоем

#### 3.1.1. Суммарная за теплый период и за год среднемноголетняя транспирация древостоем

##### Метод коэффициентов транспирационной активности

Для расчета среднемноголетней величины транспирации древостоем за вегетационный период и за год используется простая зависимость:

$$E_t = m K_{tr}, \quad (3.2)$$

где  $K_{tr}$  – коэффициент транспирационной активности, равный для сосны, ели и березы 19, 8.5 и 35 мм/т соответственно [90, 92].

Наличие зависимости между транспирацией и массой листы была показана многими исследователями [73, 164, 194, 196]. Тесная связь между относительной величиной потенциальной транспирации за месяц, определенной по методу Пенмана-Монтейса [239], и листовым индексом показана в работе [243]. До практического использования при расчетах суммарного испарения с леса этот подход был доведен О. И. Крестовским [92, 98] при оценке влияния рубок и структуры лесного фонда на водность рек. С уточненными параметрами данный метод использовался при оценке влияния гидролесомелиорации и возможного потепления на элементы водного баланса речных водосборов Карелии и Финноскандии [86, 90, 231].

В указанных выше работах подчеркивалось установленное эмпирическим путем постоянство коэффициента транспирационной активности  $K_{tr}$  для одних и тех же пород во времени и по территории и его независимость от метеорологических и климатических факторов. Этот факт с физиологической точки зрения подтверждает Л. К. Кайбияйнен [73]. На основании наличия тесной корреляционной связи между площадью активной ксилемы ствола и массой хвои он делает вывод о том, что постоянство проводящей способности единицы площади ксилемы (проводящие ткани растений) обеспечивает постоянство транспирационной способности единицы массы листы. Колебания удельной транспирации за вегетационный сезон возможны в ограниченных пределах, так как сверху они ограничены естественной проводимостью ксилемы, что сдерживает интенсивность транспирации в самых благоприятных

для этого процесса условиях. Свидетельствами наличия нижнего предела объема транспирируемой влаги служат увеличивающийся в засушливые периоды опад хвои в лесах и снижение площади поперечного сечения ксилемы у деревьев тех типов, где хуже условия влагообеспечения [73].

Коэффициент транспирационной активности в (3.2) показывает количество транспирируемой за вегетационный сезон влаги единицей массы листвы, и является усредненным для различных метеорологических условий показателем скорости и объема перемещения влаги от корня к листьям по проводящим тканям растения – ксилеме. Утверждение о постоянстве коэффициента транспирационной активности справедливо только для усредненных за многолетний период метеорологических условий. Полученные Л. К. Кайбияйне некоторые колебания скорости перемещения влаги по ксилеме и ее объема за вегетационный сезон, а также коэффициента транспирационной активности по конкретным годам в сосняках разных типов объяснялись им влиянием меняющихся метеоусловий [73]. В частности, небольшое снижение скорости потока пасоки и некоторое уменьшение коэффициента транспирационной активности в один из сезонов он объяснял влиянием повышенного количества осадков. Учитывая, что для дождливого сезона характерно меньшее поступление солнечной радиации и пониженное значение дефицита влажности воздуха, такое объяснение можно признать соответствующим существующим представлениям о процессе транспирации и об определяющих его факторах.

Действие регулирующей системы прослеживается с помощью формулы для расчета транспирации древостоя, используемой в [234], которую после подстановки известных физических констант можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$E_t = [0.622\Delta r_a B_V / (1005(r_s + r_a) + 1555\Delta r_a)] + [0.8LAId / (1005(r_s + r_a) + 1555\Delta r_a)]. \quad (3.3)$$

Первое слагаемое (3.3) отражает влияние лучистой энергии солнца, а второе – дефицита влажности воздуха на транспирацию. При усредненных метеорологических условиях и характеристиках леса первое слагаемое на порядок меньше второго, что соответствует отклику устьичного сопротивления и интенсивности транспирации на режим факторов внешней среды. В качестве фактора,

лимитирующего величину устьичного сопротивления и транспирации, лучистая энергия солнца проявляется, главным образом, в утренние часы при низких значениях суммарной радиации (в среднем до  $200 \text{ Вт/м}^2$ ) [29, 132]. В большей степени от величины солнечной энергии зависит дефицит влажности воздуха. С увеличением солнечной радиации он возрастает, что, с одной стороны, создает условия для роста транспирации, а с другой, – ведет к увеличению устьичного сопротивления [29, 132], обуславливая тем самым снижение транспирации. Итогом таких взаимосвязей является высокая устойчивость физиологических процессов к колебаниям метеорологических факторов и зависимость усредненных во времени характеристик этих процессов преимущественно от свойств растений, к которым относятся пределы колебаний устьичных сопротивлений (проводимостей), взаимосвязанных с величинами транспирационных коэффициентов. Так, при средних значениях последних для ели и сосны 8.5, 19 мм/т, средние величины полученных подбором для среднетаежных условий ЕСР устьичных проводимостей ели составляют 0.7 мм/с, сосны – 1.2 мм/с.

Ниже приведен анализ, опубликованный ранее в [18], где дано обоснование для использования метода расчета суммарного испарения с леса, в котором транспирация древостоя рассчитывается с использованием коэффициентов транспирационной активности. Хорошее соответствие между значениями испарения, полученными по данному методу и по традиционным, официально рекомендованным, а также все изложенное выше дает основание утверждать, что метод коэффициентов транспирационной активности можно использовать для расчета среднесуточной величины транспирации.

#### Метод Хильми

Чаще всего при гидрологической оценке хозяйственной деятельности в лесу определение транспирации методом, основанным на применении коэффициента транспирационной активности, является достаточно корректным. Этот метод позволяет объективно оценивать возрастную динамику транспирации производных лесов, поскольку изменение массы листового аппарата происходит согласованно с естественным изменением остальных таксационных характеристик древостоя. Однако в отдельных случаях под влиянием антропогенных факторов естественное соотношение частей древостоя

может нарушаться [172]. Отклонение естественного соотношения массы хвои и других составных частей древостоя от естественного, соответствующего возрасту биогеоценоза, может привести к некоторым преобразованиям коэффициента транспирационной активности и, следовательно, к погрешностям при определении послерубочных изменений транспирации. Снизить или оценить ошибки расчетов в данном случае, с нашей точки зрения, можно с помощью других методов, принципиально отличающихся от указанного. Одним из них может служить метод, теоретические основы которого заложены Г. Ф. Хильми [203]. Это заявление основывается на том, что параметры, используемые в методе Г. Ф. Хильми (удельное расходование влаги древостоем), как показали наши исследования, зависят от бонитета, который является наиболее инерционным показателем состояния древостоя и его можно принимать неизменным и после рубок ухода. При этом влияние возможных изменений в древостое (изменение интенсивности прироста стволовой древесины, хвои и корней [172]) на суммарное испарение можно оценивать, моделируя различные сценарии развития биогеоценоза после рубок. Кроме того, при отсутствии зачастую возможностей экспериментального определения транспирации уверенность в достоверности ее вычисления при решении различных, в том числе и водохозяйственных задач можно получить только при использовании нескольких принципиально различающихся расчетных методов.

Расчетную формулу Г. Ф. Хильми представил в виде суммы двух слагаемых, одно из которых показывает расход воды на поддержание существующей фитомассы древостоя, а второе – на формирование ее прироста [203]:

$$E_t = \mu_{\Sigma} \Sigma M + \rho_{\Sigma} \Delta M, \quad (3.4)$$

где  $E_t$  – транспирация древостоем, мм;  $\Sigma M$  – запас фитомассы древостоя,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;  $\mu_{\Sigma}$  – норма удельного потребления влаги для поддержания жизнедеятельности фитомассы древостоя,  $(\text{мм га})/\text{м}^3$ ;  $\Delta M$  – текущий прирост запаса фитомассы древостоя,  $\text{м}^3/(\text{га год})$ ;  $\rho_{\Sigma}$  – норма удельного потребления влаги на прирост фитомассы древостоя,  $(\text{мм га})/\text{м}^3$ .

В связи со сложностью определения характеристик всей фитомассы древостоя Г. Ф. Хильми в формуле (3.4), предполагая наличие пропорциональности между характеристиками (запасом и приростом) всей фитомассы древостоя и стволовой древесины, в

качестве независимых переменных использовал показатели последней. В этом случае формула (3.4) может быть представлена в следующем виде:

$$E_t = \mu M + \rho \Delta M, \quad (3.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент, характеризующий удельное потребление влаги для поддержания жизнедеятельности древостоя, (мм га)/м<sup>3</sup>;  $M$  – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;  $\Delta M$  – текущий прирост запаса стволовой древесины, м<sup>3</sup>/(га год);  $\rho$  – коэффициент, характеризующий потребление влаги на прирост древостоя, (мм га)/м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что такое разделение потребляемого растениями водного потока подтверждается существованием статистических зависимостей годовой транспирации как от запаса древостоя, так и от годового прироста древесины [194].

Одним из условий возможности применения уравнения (3.5) для расчета транспирации является то, что удельный расход воды древесными породами с возрастом не меняется. В своей работе [203] Г. Ф. Хильми по опубликованным данным для сосняка брусничного показал, что рассчитанные значения транспирации удовлетворительно описывают ее возрастную динамику при использовании соответствующих значений запаса и прироста стволовой древесины и постоянных для конкретного типа леса коэффициентов водопотребления ( $\mu$  и  $\rho$ ).

Г. Ф. Хильми ограничился только разработкой и обоснованием концепции определения транспирации, используя данные о приросте и запаса древесины. Доведение до практического применения уравнения (3.5) предполагает решение, по крайней мере, двух проблем. Одна из них связана с тем, что использование в практике (3.5) даже при справедливости уравнения (3.4) основывается на пропорциональности объемов стволовой древесины и всей фитомассы древостоя. Поскольку в молодых лесах (I и II классы возраста) отмечается некоторое изменение соотношения между частями древостоя с возрастом [69, 71, 72], то необходимо оценить возникающую при этом ошибку расчета транспирации по (3.5) и возможность применения этого уравнения для решения тех или иных задач. Другой важной проблемой, затрудняющей применение при решении практических задач уравнения (3.5), является определение коэффициентов  $\mu$  и  $\rho$ .

Для решения указанных проблем были рассчитаны величины  $\mu$  и  $\rho$  для 10 типов сосняков, 7 – ельников и 6 – березняков. Таксационные характеристики древостоя для всех этих типов леса были взяты из таблиц [107], составленных в Институте леса КарНЦ РАН для Карелии. Расчеты выполнялись в следующей последовательности. Для каждого из приведенных в [107] типов леса была рассчитана возрастная динамика транспирации по (3.2), при этом масса листы определялась по формуле (1.12). Наличие в [107] данных по возрастной динамике запаса стволовой древесины и ее текущего прироста, а также рассчитанных по (3.2) значений транспирации позволило с использованием формулы (3.5) получить значения коэффициентов  $\mu$  и  $\rho$  (табл. 3.1). Приведенные в табл. 3.1 классы бонитета являются усредненными для всего возрастного ряда каждого типа леса. Для хвойных лесов таксационные характеристики в таблицах хода роста приведены через 10 лет до 100-летнего возраста и через 20 лет – до 160-летнего возраста. Для березняков возрастной ряд представлен от 10-летних до 100-летних древостоев с интервалом в 10 лет [107].

Таблица 3.1

**Параметры формулы (3.5) для различных типов леса**

Сосна				Ель				Береза			
Тип леса	Класс бон.	$\mu$	$\rho$	Тип леса	Класс бон.	$\mu$	$\rho$	Тип леса	Класс бон.	$\mu$	$\rho$
лиш.	IV.8	0.64	24.52	бр.	IV.1	0.49	23.06	зб.	III.4	1.08	28.89
вер.	IV.4	0.50	24.28	чс.	III.6	0.38	21.43	ртч.	II.7	0.84	27.89
бр.	III.7	0.36	23.81	кис.	II.8	0.26	19.89	зрт.	I.8	0.61	26.92
чс.	III	0.27	22.31	чв.	IV.3	0.54	23.45	бт.	III.8	1.20	30.10
чкл.	II.5	0.22	19.97	бт.	IV.5	0.59	23.36	одол.	IV.2	1.41	28.92
чв.	III.8	0.40	23.06	дол.	V.0	0.74	24.09	осф.	V.0	1.73	32.13
дол.	IV.3	0.50	23.34	хсф.	V.6	0.97	25.63				
бт.	IV.8	0.62	23.17								
осф.	V.3	0.84	22.48								
сф.	V.7	1.05	21.42								

*Примечание.* Лиш. – лишайниковый, вер. – вересковый, бр. – брусничный, чс. – черничный свежий, чкл. – чернично-кисличный, чв. – черничный влажный, дол. – долгомошный, бт. – багульниковый, осф. – осоково-сфагновый, сф. – сфагновый, кис. – кисличный, бт. – болотно-гравяный, хсф. – хвошово-сфагновый, зб. – злаково-брусничный, ртч. – разнотравно-черничный, зрт. – злаково-разнотравный, одол. – осоково-долгомошный.

Выполненный анализ показал, что для всех типов леса отмечается хорошее соответствие возрастной динамики транспирации между результатами расчетов по (3.2) и по (3.5). Среднеквадратические отклонения ( $\sigma$ ) определенных по (3.5) величин транспирации от рассчитанных по (3.2) изменяются для разных типов леса от 5 до 12 мм. По отношению к средним для всего возрастного ряда значениям транспирации они составляют 3–6%. Наибольшие расхождения между рассчитанными по двум методам значениями в каждом возрастном ряду не превышают в сосняках 10%, а в ельниках 13%. В березняках, при достаточно хорошем соответствии результатов расчета практически для всех членов возрастных рядов (в среднем расхождения составляют 3–4%), в 10-летних древостоях расхождения достигают 35%. Данное положение можно объяснить, по-видимому, более высокой долей листы в фитомассе березняка в этом возрасте по сравнению с рассчитанной по (1.12), а также низкой точностью определения таксационных характеристик молодого древостоя.

На основании вышеприведенных оценок можно отметить, что в целом имеющиеся расхождения соответствуют точности определения используемых в уравнениях (3.2) и (3.5) характеристик, и они не превышают допустимых в гидрологических расчетах ошибок. Следовательно, допущение о пропорциональности объемов стволовой древесины и всей фитомассы древостоя не приводит к серьезным ошибкам при расчете транспирации по (3.5). В качестве примера на рис. 3.1 показаны результаты расчета динамики транспирации данными методами для двух типов сосняков: чернично-кисличного и сфагнового (классы бонитета по М. М. Орлову [108] соответственно II.5 и V.7).

Обоснованием для разработки методов расчета коэффициентов  $\mu$  и  $\rho$  может служить вывод Г. Ф. Хильми о возрастании энергетических затрат на извлечение корневой системой из почвы элементов питания для снабжения и построения единицы фитомассы со снижением плодородия почв [202]. Увеличение энергозатрат при оптимальном увлажнении почвогрунтов, что характерно для таежной зоны, в данном случае должно сопровождаться ростом транспирации. Следовательно, значения коэффициентов  $\mu$  и  $\rho$  будут возрастать со снижением плодородия почв.

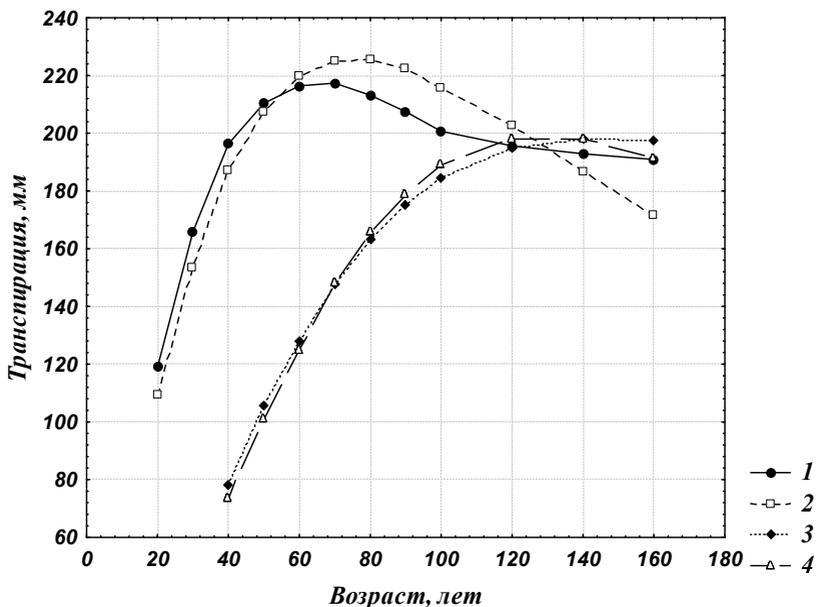


Рис. 3.1. Транспирация сосняком чернично-кисличным (1, 2) и сосняком сфагновым (3, 4), рассчитанная по методу транспирационных коэффициентов (1, 3) и по Хильми (2, 4)

Этот вывод подтверждается также и следующими, с нашей точки зрения, логичными рассуждениями. Очевидно, что для поддержания жизнедеятельности единицы фитомассы, так же как и для ее прироста требуются определенные количества  $i$ -го минерального элемента, которые обозначим  $P_{iM}$  и  $P_{i\Delta M}$ . Тогда минимальную величину удельного расходования растениями воды для поддержания жизнедеятельности и для прироста, учитывая, что основной объем минеральных веществ поступает в растение вместе с почвенной водой, можно определить из следующих выражений:

для жизнедеятельности

$$\mu_{\Sigma min} = P_{iM} / C_i, \quad (3.6)$$

для прироста

$$\rho_{\Sigma min} = P_{i\Delta M} / C_i, \quad (3.6')$$

где  $C_i$  – концентрация лимитирующего жизнедеятельность и прирост  $i$ -го минерального элемента в почвенном растворе.

В общем случае концентрация питательных элементов в почвенном растворе уменьшается с увеличением класса бонитета (ухудшением плодородия почв), следовательно, между удельным потреблением воды из почвы для снабжения растения минеральными веществами и классом бонитета существует обратная зависимость: ухудшение бонитета (увеличение его класса) сопровождается возрастанием удельного расхода воды растением. Существование отмечаемых в литературе зависимостей между продуктивностью древостоя и наличием питательных веществ в почве позволяет считать, что уравнения (3.6) и (3.6') определяют значительную часть удельных расходов влаги.

Значения коэффициентов  $\rho$  и  $\mu$ , приведенные в табл. 3.1, являются свидетельством справедливости в целом вышеприведенных рассуждений о влиянии продуктивности почвогрунтов, обуславливающей в значительной степени тип леса и класс его бонитета, на удельный расход воды древостоем. Ухудшение лесорастительных условий (увеличение класса бонитета) сопровождается в большинстве случаев увеличением расхода воды единицей фитомассы как для роста, так и для поддержания жизнедеятельности. При улучшении условий роста леса ситуация меняется в противоположную сторону.

Для получения количественной оценки этой зависимости классы бонитетов древостоя были заменены на показатели классов бонитета (раздел 1.4). Классы бонитета устанавливались по таблицам М. М. Орлова [108].

Нужно отметить, что вид зависимостей между показателями классов бонитета (соответствует концентрации минерального элемента в почвенном растворе) и коэффициентами  $\mu$  (рис. 3.2) для всех пород близок к гиперболическому. При наибольшей степени соответствия с эмпирическими точками данная зависимость описывается экспоненциальным уравнением:

$$\mu = a \exp(-b Kl), \quad (3.7)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты регрессии, равные для сосняков, ельников и березняков соответственно 1.87, 0.49; 1.90, 0.47; 3.45, 0.33;  $Kl$  – показатель класса бонитета, обозначенный арабскими цифрами.

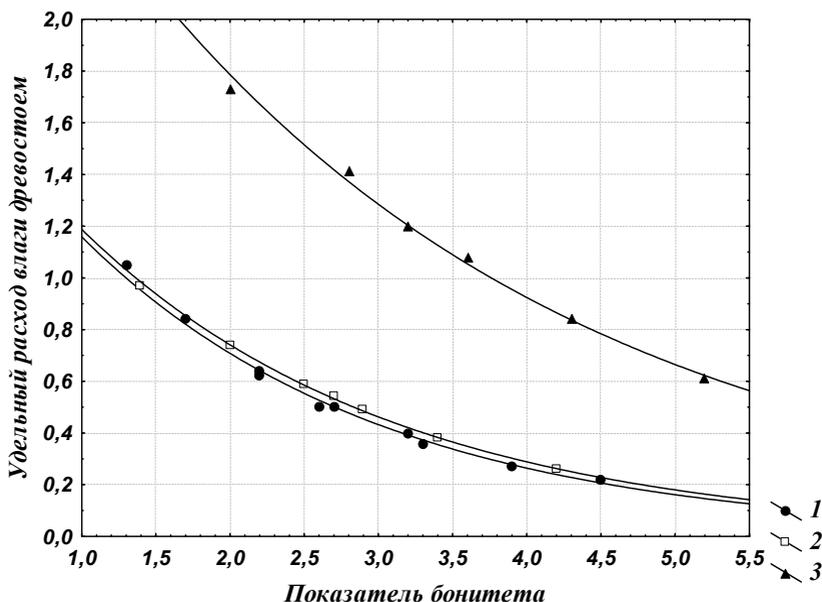


Рис. 3.2. Зависимость расхода воды для поддержания жизнедеятельности единицы объема фитомассы от показателя бонитета (1 – сосна, 2 – ель, 3 – береза)

Формула (3.7) характеризуется для всех пород высокой степенью надежности. Изменчивость удельного расхода воды древесостоем для поддержания жизнедеятельности более чем на 90% обуславливается лесорастительными условиями.

Анализ связи удельного расхода влаги для роста сосняков ( $\rho$ ) с лесорастительными условиями (см. табл. 3.1) показывает, что этот расход зависит как от бонитета, так и от степени увлажнения корнеобитаемого слоя. В соответствии с этими факторами насаждения можно разделить на две группы: 1) растущие на суходолах, 2) растущие на болотах или заболоченных землях. Древостои первой группы в таежной зоне произрастают, как на это указано выше, практически в оптимальных по увлажненности почв условиях. Поэтому фактором, лимитирующим в данных растениях интенсивность физиологических процессов, является наличие питательных веществ в почве, и здесь отмечается рост коэффициента  $\rho$  с ухуд-

шением условий роста (увеличением класса бонитета). Корневая система деревьев, произрастающих на болотах и заболоченных землях, находится зачастую в условиях избытка влаги. Для этой группы древостоя на интенсивность поглощения корнями влаги и роста растения влияет как наличие питательных веществ, так и аэрированность корнеобитаемого слоя. В этой связи зависимость между классом бонитета и удельным расходом воды растениями приобретает обратный характер: увеличение класса бонитета сопровождается снижением  $\rho$  и его наименьшее значение отмечается для самого низкопродуктивного сосняка сфагнового, произрастающего при наиболее высоком уровне болотных вод. Важно отметить, что в работе [69] авторы отмечают различия в накоплении и потреблении минеральных веществ у насаждений сосны в зависимости от увлажнения почвогрунтов.

Наличие такой сложной зависимости между коэффициентом водопотребления ( $\rho$ ) и лесорастительными условиями исключает возможность использования ее в качестве расчетной. Вместе с тем для всех исследуемых пород древостоя отмечается увеличение относительного удельного расходования воды на рост (по отношению к затратам воды на осуществление жизнедеятельности) с улучшением условий роста леса (рис. 3.3). Данная зависимость имеет следующее аналитическое выражение:

$$\rho/\mu = c \exp(d Kl), \quad (3.8)$$

где  $c$  и  $d$  – коэффициенты, равные для сосняков, ельников и березняков соответственно 13.28, 0.45; 15.33, 0.38; 10.07, 0.28.

Дисперсия отношения (3.8) более чем на 90% определяется изменчивостью условий произрастания.

Удельный расход влаги на прирост менее интенсивно снижается с улучшением лесорастительных условий, чем расход воды на обеспечение жизнедеятельности, поэтому отношение  $\rho/\mu$  представляет собой возрастающую функцию.

Приведенные формулы (3.5), (3.7) и (3.8) позволяют рассчитывать транспирацию соснового, елового и березового древостоя в зависимости от лесорастительных условий, запаса и прироста стволовой древесины. Проверка данной модели выполнялась с использованием независимого материала, полученного в карельских лесах [69, 71, 72], а также во всей таежной зоне [193]. В первом

случае расхождения результатов расчета по (3.2) и (3.5) не превышали 15%. Для всей таежной зоны более чем в 90% случаев данные расхождения не превышали 20%.

В заключение можно отметить, что в целом имеющиеся расхождения соответствуют точности определения используемых в уравнениях (3.2) и (3.5) параметров, и они не превышают допустимых в гидрологических расчетах ошибок. Следовательно, метод Хильми может быть использован для определения транспирации в лесах Карелии при наличии данных о запасе стволовой древесины, ее текущем приросте и бонитете.

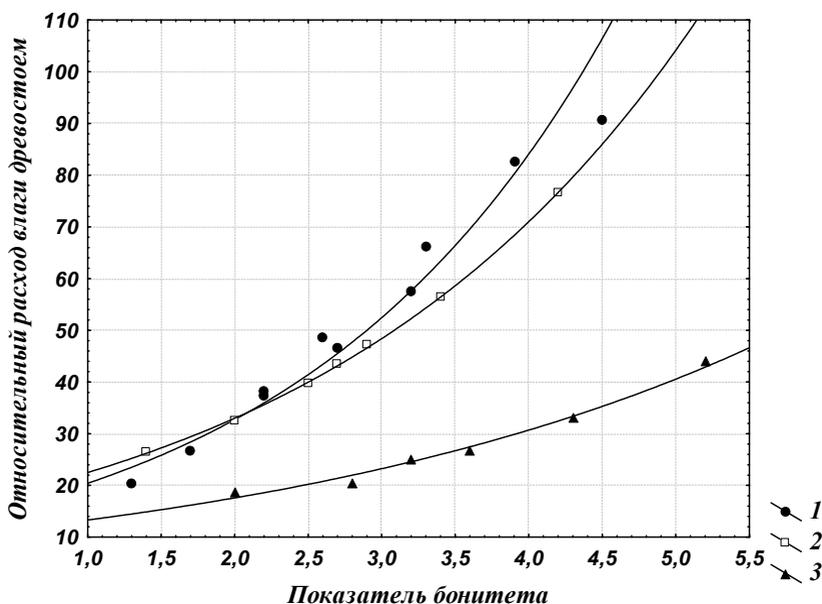


Рис. 3.3. Зависимость относительного расхода воды (отношение удельного расхода воды для прироста к удельному расходу воды для поддержания жизнедеятельности) для прироста единицы фитомассы от показателя бонитета (1 – сосна, 2 – ель, 3 – береза)

Определению транспирации и ее изменений в результате хозяйственной деятельности по данным о всей фитомассе древостоя препятствует, в первую очередь, отсутствие данных о  $\mu_{\Sigma}$  и  $\rho_{\Sigma}$ . Кроме того, количество всей фитомассы и ее прирост оцениваются в

единицах массы, тогда как при таксации лесных угодий определяется только количество стволовой древесины и только в единицах объема (запас). Возможность использования для расчета транспирации всей фитомассы показана ниже.

Переход от масс к объемам (запасам) осуществляется с использованием следующих очевидных соотношений:

$$\Sigma M = \Sigma P / \gamma_{\Sigma}, \quad \Delta \Sigma M = \Delta \Sigma P / \gamma_{\Delta \Sigma}, \quad (3.9)$$

$$M = P / \gamma, \quad \Delta M = \Delta P / \gamma_{\Delta}, \quad (3.9^1)$$

где  $\Sigma M$  и  $M$  – суммарный объем (запас) всех частей древостоя и объем стволовой древесины соответственно;  $\Delta \Sigma M$  и  $\Delta M$  – прирост объема всех частей древостоя и прирост объема стволовой древесины соответственно;  $\Sigma P$  и  $P$  – суммарная масса всех частей древостоя и масса стволовой древесины соответственно;  $\Delta \Sigma P$  и  $\Delta P$  – суммарный прирост массы всех частей древостоя и прирост массы стволовой древесины;  $\gamma_{\Sigma}$  – средняя объемная масса всех частей древостоя;  $\gamma$  – объемная масса стволовой древесины;  $\gamma_{\Delta \Sigma}$  – средняя объемная масса прирастающих частей древостоя;  $\gamma_{\Delta}$  – объемная масса прирастающей стволовой древесины.

Разделив соответствующие равенства из (3.9) на равенства из (3.9<sup>1</sup>), получаем следующие отношения:

$$\Sigma M / M = \gamma / \gamma_{\Sigma} (\Sigma P / P) = K_P \gamma / \gamma_{\Sigma}, \quad (3.10)$$

$$\Delta \Sigma M / \Delta M = \gamma_{\Delta} / \gamma_{\Delta \Sigma} (\Delta \Sigma P / \Delta P) = K_{\Delta P} \gamma_{\Delta} / \gamma_{\Delta \Sigma}, \quad (3.10^1)$$

где  $K_P = \Sigma P / P$ ;  $K_{\Delta P} = \Delta \Sigma P / \Delta P$ .

Можно, вероятно, с небольшой долей погрешности предположить, что  $\gamma_{\Sigma} = \gamma$  и  $\gamma_{\Delta \Sigma} = \gamma_{\Delta}$ . В этом случае получается, что  $\Sigma M / M = \Sigma P / P$ , а  $\Delta \Sigma M / \Delta M = \Delta \Sigma P / \Delta P$ . Если выразить из этих соотношений  $M$  и  $\Delta M$ , то получим выражение для определения транспирации по суммарному объему фитомассы древостоя и его приросту:

$$E_t = \mu \Sigma M / K_P + \rho \Delta \Sigma M / K_{\Delta P}. \quad (3.11)$$

В уравнении (3.11)  $\Sigma M$  и  $\Delta \Sigma M$  заменим на их значения из (3.9), кроме того, допустим, что  $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\Delta \Sigma}$ , тогда (3.11) можно представить в следующем виде:

$$E_t = (\mu \Sigma P / K_P + \rho \Delta \Sigma P / K_{\Delta P}) / \gamma_{\Sigma}. \quad (3.12)$$

Значение  $\gamma_{\Sigma}$  характеризует среднюю плотность всех частей существующей и прирастающей фитомассы древостоя. Кроме того, в это значение, по-видимому, включаются и ошибки, полученные

из-за принятых упрощений, поэтому  $\gamma_{\Sigma}$  лучше определить из уравнения (3.12). Используя данные из [69, 71, 72] и определив транспирацию по (3.2), получаем значения  $\gamma_{\Sigma}$  для сосны, ели и березы, равные 0.45; 0.45; 0.49.

В настоящее время имеются публикации с данными о возрастной динамике характеристик фитомассы древостоя различных пород и произрастающего в различных лесорастительных условиях. Обобщение большого количества таких публикаций выполнено В. А. Усольцевым [193], что позволило нам, используя приведенные им данные, получить для сосны, ели и березы эмпирические зависимости между соотношениями масс всей растущей части древостоя и стволовой древесины, а также прироста фитомассы и стволовой древесины от возраста и класса бонитета. Эти уравнения имеют следующий вид:

для сосны

$$K_P = \Sigma P/P = \exp(1.477 - 0.031 Kl) / \tau^{0.222}, \quad (3.13)$$

$$K_{\Delta P} = \Delta \Sigma P/\Delta P = \exp(1.178 - 0.047 Kl) / \tau^{0.047}, \quad (3.13^1)$$

для ели

$$K_P = \Sigma P/P = \exp(1.423 - 0.048 Kl) / \tau^{0.166}, \quad (3.14)$$

$$K_{\Delta P} = \Delta \Sigma P/\Delta P = \tau^{0.11} \exp(0.94 - 0.07 Kl), \quad (3.14^1)$$

для березы

$$K_P = \Sigma P/P = \exp(1.779 - 0.10 Kl) / \tau^{0.21}, \quad (3.15)$$

$$K_{\Delta P} = \Delta \Sigma P/\Delta P = \tau^{0.18} \exp(1.49 - 0.21 Kl), \quad (3.15^1)$$

где  $Kl$  – показатель класса бонитета;  $\tau$  – возраст древостоя, лет.

### 3.1.2. Интенсивность транспирации древостоем

Для определения транспирации древостоем за короткие интервалы времени за рубежом широкое распространение получил метод, предложенный Пенманом [147, 242], который после дальнейшего развития его в работах Монтейса [239] получил название «метод Пенмана-Монтейса» [221, 223, 230, 234 и др.]. В этом методе наряду с метеорологическими условиями учитываются биофизические и физиологические особенности растений и их морфометрические характеристики, что позволяет считать его перспективным для оценки гидрологической роли хозяйственной деятельности, связанной с преобразованием растительного покрова.

Сложность применения данного метода заключается в том, что необходимые для расчета параметры далеко не всегда удается получить.

В практических расчетах транспирации деревьями формула Пенмана-Монтейса может быть представлена в следующем виде [234]:

$$E_t = (\Delta B_V + \rho C_p d g_a LAI) / (L(\Delta + \gamma_E (g_a / g_s))), \quad (3.16)$$

где  $\Delta$  – производная от формулы, выражающей зависимость максимальной упругости водяного пара от температуры, гПа/град;  $\gamma_E$  – психрометрическая константа ( $\gamma_E = C_p P_a / 0.622L$ );  $B_V$  – остаточная величина коротковолновой солнечной радиации в кроновом пространстве, кДж/м<sup>2</sup>;  $d$  – дефицит влажности воздуха, кПа;  $g_a$  – проводимость пограничного слоя (аэродинамическая проводимость) – величина, обратная сопротивлению диффузии при переносе водяного пара с поверхности листа через пограничный слой в атмосферу, м/с;  $g_s$  – внутренняя (устычная) проводимость – величина, обратная внутреннему сопротивлению переноса водяного пара из межклетника на поверхность листа, м/с.

Формула (3.16) показывает, что в конкретных метеорологических условиях транспирация древостоем зависит от удельной площади листового аппарата (листового индекса) и биофизических свойств растений, различия которых определяются в основном породой дерева.

Величины листового индекса для каждого конкретного случая вычисляются по формуле (1.13), а масса листвы – по (1.12).

Значение солнечной радиации, определяющей испарение во всем кроновом пространстве, вычисляется по предлагаемой в работе [234] формуле:

$$B_V = (1-A) Q_0 (1 - \exp(-k LAI)) / k LAI, \quad (3.17)$$

где  $A$  – альbedo леса;  $Q_0$  – суммарная солнечная радиация на верхней границе леса, кДж/м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент ослабления радиации в пологе, равный 0.5.

Большую сложность представляет определение проводимости пограничного слоя  $g_a$  и устьичной проводимости  $g_s$  или обратных им величин сопротивления ( $r_a = 1/g_a$  и  $r_s = 1/g_s$ ).

Величина  $g_a$  ( $r_a$ ) зависит, главным образом, от формы листа и скорости ветра [179, 239]. В свою очередь на скорость ветра влияет

листовой индекс и высота древостоя. Поэтому для лиственных пород отмечаются некоторые вариации  $g_a$  в течение года [243]. Так как высота древостоя зависит от его возраста, то, следовательно, возможны некоторые изменения  $g_a$  в течение всего периода роста и развития производного леса. Однако в конкретном кроновом пространстве колебания скорости ветра в большинстве случаев (за исключением мелколесья) незначительны, поэтому в качестве основного параметра, определяющего вариации  $g_a$ , можно принимать форму листа. На этом основании в ряде работ проводимость (сопротивление) пограничного слоя  $g_a$  ( $r_a$ ) для конкретной породы принята постоянной. Выполненный анализ показал, что для условий среднетаежной подзоны ЕСП значения  $g_a$  можно принимать равными: для сосны – 0.17, для ели – 0.2 и для березы – 0.17 м/с. Эти значения взяты из публикаций [247, 234 и 230].

Внутренняя проводимость (сопротивление) рассматривается в литературе как для отдельного листа ( $g_l$ ), так и для полога древостоя (листовой поверхности) ( $g_s$ ) [229, 232, 239]. Между устьичной проводимостью полога и проводимостью отдельного листа существует связь [229]:

$$g_s = f(LAI) g_l. \quad (3.18)$$

В исследованиях часто принимают, что  $f(LAI) \cong LAI$ .

Устьичная проводимость зависит от биологических свойств растений и гидрометеорологических факторов (солнечной радиации, влажности почвы и воздуха и его температуры). Ее значения по данным многих авторов изменяются в широких пределах: для сосны от  $0.5 \cdot 10^{-3}$  до  $4.0 \cdot 10^{-3}$  м/с; для ели – от  $0.4 \cdot 10^{-3}$  до  $2.6 \cdot 10^{-3}$  м/с и для березы – от  $0.3 \cdot 10^{-3}$  до  $11.1 \cdot 10^{-3}$  м/с [29, 173, 175, 224, 235, 238, 241]. Такой разброс значений  $g_s$  для всех пород и отсутствие убедительных зависимостей, доказывающих достоверность таких диапазонов колебаний, создает большие сложности определения устьичной проводимости. Это является одним из серьезных факторов, сдерживающих применения метода Пенмана-Монтейса для решения практических задач.

Среди отечественных методов определения транспирации следует отметить подходы, освещенные в работах [22, 187]. При этом расчеты суммарного испарения показывают удовлетворительную точность при возможности калибровки некоторых параметров [187].

Существующая неопределенность, в первую очередь, при определении аэродинамической и устьичной проводимостей (сопротивлений), сложность в сборе необходимой для решения метеорологической информации ограничивают в настоящее время применение всех моделей транспирации древостоя и суммарного испарения с леса с короткими временными шагами. Поэтому важной задачей является поиск путей более простого решения этих проблем, что наряду с прочим предполагает возможность дифференцированного по регионам подхода к выполнению расчетов.

Характерной особенностью среднетаежной подзоны Европейского Севера России является высокая увлажненность, что создает условия, при которых запасы почво-грунтов не лимитируют в большинстве случаев влагопотребление растительным покровом. Это позволяет ограничить при расчетах число переменных, обуславливающих испарение растительным покровом.

Устьичное сопротивление является регулятором интенсивности диффузии водяного пара, отмечается тенденция его увеличения (а устьичной проводимости – уменьшения) с ростом дефицита влажности воздуха и уменьшения – с увеличением солнечной радиации, хотя только при низких ее значениях и в узком интервале (от 0 до 50–150 Вт/м<sup>2</sup>) [28, 29, 132, 188, 230]. Вместе с тем некоторые исследователи, оценивающие влияние на устьичное сопротивление метеорологических условий, отмечают их незначительную роль в регулировании интенсивности диффузионного потока водяного пара в устьицах. Такое положение в большей степени должно относиться к зоне достаточного увлажнения, где растения не испытывают дефицита влаги и интенсивность транспирации в самых благоприятных для этого процесса метеорологических условиях ограничена сверху только естественной проводимостью ксилемы [73]. В регионах, где возможны дефициты влаги, роль гидрометеорологических факторов возрастает. Для данных регионов ощутимым фактором изменчивости устьичного сопротивления является водный потенциал почвы [28].

По оценке А. В. Варлагина и Н. Н. Выгодской [29], зависимость изменчивости устьичного сопротивления ели от метеорологических факторов для зоны смешанных лесов (Тверская область)

составляет 68%, 50–80% этой изменчивости достоверно формируется за счет относительной влажности воздуха при незначительном (до 6%) вкладе ФАР.

В южнотаежной подзоне в диапазоне обычных колебаний метеорологических элементов их суммарная роль не превышает 50–60% [28]. Вместе с тем, А. Г. Молчанов [132] в своих исследованиях для этой подзоны показал, что влажность воздуха в диапазоне 40–80% (наиболее часто встречающиеся значения в летнее время) мало влияет на диффузионное сопротивление сосны.

Ко всему сказанному следует добавить, что листья в пологе находятся в различных условиях освещенности, температуры и влажности воздуха. При моделировании испарения сопротивление диффузионному потоку влаги часто принимают как осредненную величину в целом для всего кронового пространства, что усложняет учет влияния метеорологических факторов на устьичное сопротивление.

Во многих формулах для вычисления устьичного сопротивления в качестве основного параметра, характеризующего видосвые различия растений, используется минимальное сопротивление (максимальная проводимость). Вместе с тем, по выводам А. В. Варлагина [28], максимальная проводимость конкретного вида меняется в зависимости от условий произрастания. З. П. Старцева [187] также указывает, что при определении транспирации всего растительного покрова минимальное устьичное сопротивление, являющееся физиологической характеристикой растения, следует рассматривать как обобщенный показатель не только видовых признаков растений, но и климатических особенностей данной местности.

Все изложенное позволяет допустить возможность использования усредненного для конкретного региона и для каждой породы древостоя значения устьичного сопротивления (проводимости). Для проверки этого предположения транспирацию рассчитывали отдельно для каждой породы по (3.16) с суточным временным шагом с использованием различных значений проводимостей, выбираемых из полного набора опубликованных. Необходимая для расчета транспирации величина радиационного баланса определялась по (3.17). Значение суммарной солнечной энергии, поступающей на верхнюю границу кронового пространства, принималось по

данным наблюдений на метеостанции. Альбеде насаждений задавалось отдельно для трех фаз вегетационного периода: конец весны – начало лета (май – июнь), середина периода вегетации (июль – 15 августа), конец лета – начало осени (16 августа – сентябрь). Альбеде для сосняка принято равным 0.09, 0.095, 0.095; для ельника – 0.095, 0.10, 0.10; для березняка – 0.15, 0.17, 0.20 соответственно [165].

Выбор окончательных значений устьичных проводимостей основывался на соответствии друг другу значений средней транспирации за 5 лет, рассчитанных по формулам (3.16) и (3.2). Для подбора использовались насаждения, типичные для среднетаежной подзоны по условиям произрастания и по продуктивности (сосняк брусничный IV класса бонитета, ельник черничный IV класса бонитета и березняк черничный III класса бонитета). Возрастная динамика таксационных характеристик (высоты, запаса древостоя) конкретной породы вычислялась по (1.8) и (1.8').

Транспирация рассчитывалась для всех возрастных классов: от молодняков до перестойных (для хвойных пород от 20- до 140-летнего возраста с шагом в 20 лет и для березняков от 10- до 100-летнего возраста с шагом в 10 лет). Выполненный анализ показал, что для среднетаежной подзоны удовлетворительные результаты расчетов транспирации при суточном временном шаге получаются при значениях проводимости соответственно для сосняка, ельника и березняка  $1.2 \cdot 10^{-3}$ ,  $0.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.2 \cdot 10^{-3}$  м/с.

При оценке роли в транспирации дефицита влажности воздуха, который, как это следует из литературных данных, может определять наибольшую вариабельность устьичной проводимости, использовалась формула, предложенная в работе [234]:

$$g_s = g_{max}(1 - 0.3 d), \quad (3.19)$$

где  $g_{max}$  – максимальная устьичная проводимость, м/с.

Максимальная устьичная проводимость в формуле (3.19) определялась таким же методом подбора, как и осредненная. Ее значения для соснового, елового и березового лесов соответственно составляют  $1.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $0.8 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.5 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Проверка значений устьичной и аэродинамической проводимостей выполнялась на трех водосборах, различающихся по размерам и по породному составу произрастающего на них древостоя, и

для тех лет, для которых имеется наибольшая информация о метеорологических условиях. Распределение лесного фонда водосборов по породам показано в табл. 3.2.

Таблица 3.2

**Распределение лесного фонда водосборов по породам**

Река	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Доля площади, занятая различными породами, %		
		сосна	ель	береза
Кутижма	101	62	22	16
Маньга	209	33	27	40
Холодный	1.5	60	14	26

Для расчетов использовались метеорологические данные, полученные на метеостанции и посту, удаленных от водосборов не более чем на 30 км.

Транспирация древостоя за год с использованием метода Пенмана-Монтейса рассчитывалась в два этапа: за май–сентябрь транспирация определялась по (3.16), а за холодный период ее среднее значение принималось равным 2 мм [194]. Усредненные за пять лет величины транспирации приведены в табл. 3.3, здесь же для сравнения показаны результаты, полученные с использованием коэффициента транспирационной активности (3.2).

Таблица 3.3

**Средняя годовая транспирация леса (мм), вычисленная различными методами**

Водосбор реки, ручья	По (3.16)		По (3.2)
	$g_s = f(d)$	$g_s - \text{const}$	
Кутижма	102	105	97
Маньга	138	141	135
Холодный	153	155	149

При расчетах транспирации по (3.16) значение  $g_a$  везде принимались постоянными: для сосны – 0.17, ели – 0.20, березы – 0.17 м/с. Во втором столбце табл. 3.3 помещены значения транспирации, при определении которых  $g_s$  рассчитывались по (3.19). С использованием постоянных значений  $g_s$  определялась транспирация, представленная в третьем столбце.

Для проверки адекватности описания режима суточной транспирации древостоем ее значения сравнивались с суточными величинами испарения, полученными по водному испарителю ГГИ-3000, расположенному на расстоянии не более 30 км от самых удаленных точек водосборов.

Рис. 3.4 представляет собой совмещенный график суточного хода транспирации древостоем, рассчитанной по методу Пенмана-Монтейса (при  $g_s = f(d)$  и  $g_s = \text{const}$ ), суммарного суточного испарения с леса водосбора р. Кутижмы и суточного испарения с водного испарителя. «Выбросы» в показаниях испарителя, по-видимому, связаны с несовершенством методики измерения, проявляющимся в дни с большим количеством осадков.

При расчетах суточного испарения с леса все остальные члены уравнения (3.1), кроме транспирации, определялись по формулам, подробное обоснование основных из них будет дано ниже. Количество задержанных пологом леса и испарившихся жидких осадков определяется с использованием выражения, приведенного в [85]:

$$E_{il} = (P_{max} - P_{dE}) (1 - \exp(-k_l P_d)), \quad (3.20)$$

где  $P_{max}$  – максимальная емкость кроны, мм;  $P_{dE}$  – задержанные накануне, но не испарившиеся осадки, мм;  $k_l$  – коэффициент, равный для сосны 0.077, для ели – 0.092, для березы – 0.088;  $P_d$  – суточная сумма осадков, мм;

$$P_{max} = p m, \quad (3.21)$$

где  $p$  – удельная емкость насыщения фитомассы влагой, равная для сосны 0.35, для ели – 0.28, для березы – 0.45 мм/т.

Верхним пределом суточного испарения с крон является испаряемость, которая определяется по формуле [125]:

$$E_0 = 0.64 d, \quad (3.22)$$

где  $d$  – дефицит упругости водяного пара, гПа.

Возможность использования формулы (3.22) в условиях Карелии показана в [80].

Суточное испарение с наземного покрова в теплый период рассчитывается по формуле, предложенной в [166]:

$$E_s = E_0 \exp(-0.4 LAI), \quad (3.23)$$

где  $E_0$  – испаряемость за сутки, мм.

Следует отметить, что в расчетах использовались метеорологические характеристики, полученные на открытой площадке

ближайшей метеостанции, что приводит к некоторым погрешностям расчета, оценка которых требует дополнительных исследований.

Выполненный анализ показывает удовлетворительное соответствие динамики транспирации древостоя, суммарного испарения с водосбора и с водной поверхности при скользящем 5-суточном осреднении ( $r = 0.71-0.74$ ). Следовательно, вычисленная по методу Пенмана-Монтейса с использованием подобранных и указанных выше значений диффузионного и аэродинамического сопротивлений транспирация удовлетворительно описывает динамику водопотребления древостоем в течение вегетационного сезона. При этом учет зависимости устьичной проводимости от дефицита влажности воздуха не влияет существенно на полученные величины.

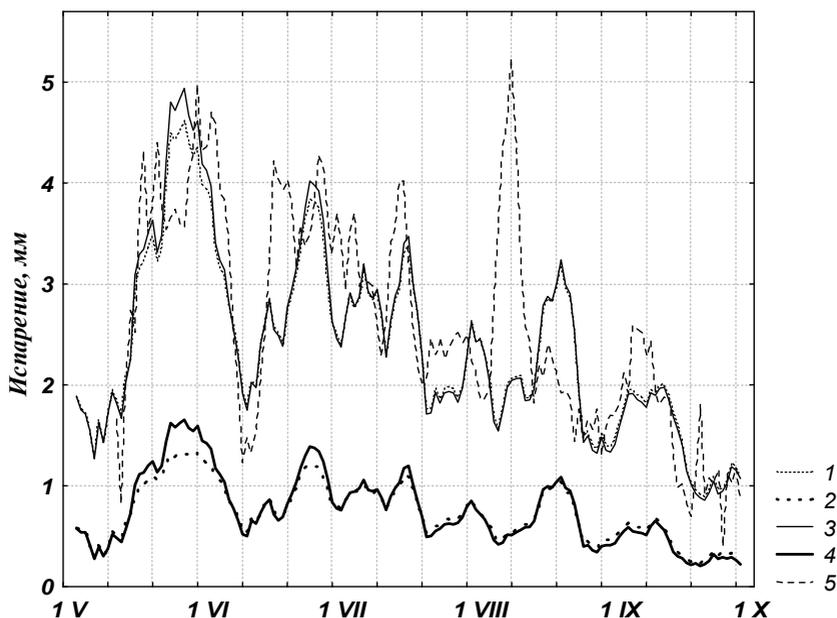


Рис. 3.4. Временной ход суммарного испарения с леса (1, 3), транспирации (2, 4) и испарения с открытой водной поверхности (5) (скользящее осреднение с шагом 5 суток) при  $g_s = f(d)$  (1, 2) и  $g_s = \text{const}$  (3, 4)

Более широкая проверка возможности расчета величины транспирации по методу Пенмана-Монтейса с использованием осредненных для каждой породы значений диффузионного сопротивления, полученных подбором, и принятого аэродинамического сопротивления была выполнена по данным для 32 залесенных водосборов Карелии. Доля, возраст и продуктивность каждой из пород на водосборах меняется в широких пределах, отражая многообразие всего лесного фонда этого региона. Метеорологические характеристики тех пяти лет, для которых выполнялись расчеты, охватывали широкий спектр степени увлажненности территории (представлены средние и аномальные по количеству выпавших осадков годы). Сравнение величин транспирации, полученных суммированием суточных значений по методу Пенмана-Монтейса (3.16) и затем осредненных за пять лет, с величинами, рассчитанными по коэффициенту транспирационной активности (3.2), показало превышение первых над вторыми на 2–8 мм (1–9%). Эти величины лежат в пределах точности определения элементов водного баланса. Все это позволяет сделать вывод, что принятые нами значения устьичной и аэродинамической проводимостей для каждой из пород дают возможность адекватно оценить транспирацию древостоя в климатических условиях среднетаежной подзоны Европейского Севера России.

В заключение можно отметить, что среднегодовалую транспирацию древостоя с удовлетворительной точностью можно вычислять как с использованием метода транспирационных коэффициентов, так и метода Пенмана-Монтейса. При этом роль устьичной проводимости в регулировании интенсивности транспирации зависит от климатических условий и понижается с увеличением увлажненности местности.

В климатических условиях среднетаежной подзоны Европейского Севера России при расчете транспирации древостоя по методу Пенмана-Монтейса учет зависимости устьичной проводимости от метеорологических элементов практически не влияет на результаты, что позволяет в расчетах использовать осредненные по породам физиологические характеристики древостоя.

## 3.2. Испарение атмосферных осадков, задержанных пологом леса

Испарение задержанных пологом леса осадков вносит достаточно весомый вклад в общую сумму расходуемой лесом влаги. В частности, для сосновых лесов эта доля составляет около 20% от суммарного испарения и около 40% от транспирации древостоем. Для высокополнотных ельников доля этой части суммарного испарения может быть еще выше. Поэтому проблеме оценки испарения влаги с крон древостоя посвящено много исследований в России и в других странах.

Существующие методы определения испарения атмосферных осадков с полога леса в зависимости от временного шага модели испарения с леса можно разделить на две группы: 1) расчет задержания пологом леса влаги от единичного дождя и расчет ее испарения; 2) расчет задержания и испарения пологом леса атмосферных осадков за месяц, сезон и год.

### 3.2.1. Задержание пологом леса влаги от единичного дождя и испарение этой влаги

При моделировании жидкого стока с залесенного водосбора с временным шагом не более суток возникает проблема определения испарения с крон древостоя в период дождя и после его окончания. Эта задача включает в себя два вопроса: определение количества задержанной влаги и расчет ее испарения.

Исследований по оценке количества задержанной кронами деревьев влаги в различных лесах проведено очень много. Обзор многочисленной отечественной и зарубежной литературы по этому вопросу выполнялся многими исследователями, в том числе и В. В. Рахмановым [159]. В работе [248] проведено сравнение используемых в некоторых странах моделей задержания атмосферных осадков пологом хвойного леса и их испарения и сделана оценка соответствия результатов моделирования данным полевых наблюдений. Анализировали три модели: the Nordic HBV model, the AMOR model, the Rutter model. Был сделан вывод, что достаточно хорошие результаты можно получать с помощью всех трех моделей, однако лучшее соответствие между расчетными резуль-

татами и данными наблюдений получены при использовании модели «the Rutter model». В ней количество задержанной влаги определяется как функция выпавших осадков и листового индекса, а испарение рассчитывается с использованием формулы Пенмана-Монтейса.

Многими исследователями для определения перехваченных пологом леса или проникших под полог осадков были предложены простейшие зависимости искомой величины от общего количества выпавших осадков. Недостатком такого рода зависимостей является ограниченность возможностей их использования только в лесах, характеристики которых мало отличаются от тех, где собирался материал для получения данных эмпирических связей. Более ценными являются формулы, учитывающие характеристики древостоя. Теоретические исследования этой проблемы были выполнены Г. Ф. Хильми [203], на основании которых им была предложена модель задержания жидких осадков и проникновения их под полог леса, учитывающая строение и таксационные характеристики древостоя:

$$\text{при } P \leq P_{min} \quad P_{sl} = (1 - C) P + C \int_0^P f(P) dP, \quad (3.24)$$

$$\text{при } P > P_{min} \quad P_{sl} = P - P_{max}, \quad (3.25)$$

где  $P_{sl}$  – количество проникших под полог леса жидких осадков, мм;  $C$  – сомкнутость крон древостоя;  $P_{min}$  – наименьшее количество выпавших осадков, необходимое для полного насыщения полога леса, мм;  $P_{max}$  – максимальное количество влаги, удерживаемой пологом леса, мм;  $f(P)$  – характеристическая функция, соответствующая отношению площади проекции части кроны, достигшей насыщения, к площади проекции всей кроны.

Практическая реализация изложенной выше концепции была осуществлена Г. Ф. Хильми для елового леса. Представив крону ели в виде конуса, он получил следующие формулы для определения величины пропущенных пологом леса осадков:

$$\begin{aligned} \text{при } P \leq P_{min} \\ P_{sl} = (1 - C) P + C((P^2 / P_{min})(1 - R_c / R) - 0.33 \\ (P^3 / P_{min}^2)(1 - R_c / R)^2), \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\text{при } P > P_{min} \quad P_{sl} = P - P_{max}, \quad (3.27)$$

где  $R$  – радиус проекции кроны на горизонтальную плоскость (радиус основания конуса);  $R_c$  – радиус горизонтальной проекции внутренней неохвоенной части кроны, представленной в виде конуса.

Величина  $P_{min}$  выражается через высоту и удельную влагоемкость кроны:

$$P_{min} = \mu_{kr} H_{kr} (1 - R_c / R), \quad (3.28)$$

где  $\mu_{kr}$  – удельная влагоемкость кроны, кг/м<sup>3</sup>;  $H_{kr}$  – высота кроны, м.

В этом случае выражение (3.26) и (3.27) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{при } P \leq P_{min} \quad P_{sl} &= (1 - C) P + C \\ &((P^2 / \mu_{kr} H_{kr}) - 0.33(P^3 / \mu_{kr}^2 H_{kr}^2)), \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\text{при } P > P_{min} \quad P_{sl} = P - P_{max}, \quad (3.30)$$

Дальнейшее развитие этот подход получил в работе Л. П. Харитонова [201], который вывел формулы для расчетов проникновения осадков под полог сосновых и березовых деревьев.

Для соснового древостоя:

$$\text{при } P \leq P_{min} \quad P_{sl} = (1 - C) P + 0.33 C (P^3 / (\mu_{kr}^2 H_{kr}^2)), \quad (3.31)$$

$$\text{при } P > P_{min} \quad P_{sl} = P - P_{max}; \quad (3.32)$$

$$P_{min} = \mu_{kr} H_{kr} (1 - (R_c^2 / R^2))^{0.5}, \quad (3.33)$$

$$P_{max} = P_{min}(1 - 0.33(P_{min}^2 / (\mu_{kr}^2 H_{kr}^2))); \quad (3.34)$$

для березового древостоя:

$$\text{при } P \leq P_{min} \quad P_{sl} = (1 - C) P + 0.167 C (P^3 / (\mu_{kr}^2 H_{kr}^2)), \quad (3.35)$$

$$\text{при } P > P_{min} \quad P_{sl} = P - P_{max}. \quad (3.36)$$

В работе [148] вместо параметра сомкнутости крон, учитывающего лишь просветы между кронами, введен коэффициент ажурности (сквозистость или «дырчатость» полога) ( $A_n$ ). Этот показатель характеризует долю просветов в пологе древостоя, а рекомендации по его определению приведены в работах [1, 38, 204, 205]. Значение  $A_n$  зависит от породного состава и возраста древостоя. Для наиболее распространенных пород, в тайге ЕСР, величины коэффициентов ажурности приспевающих и спелых древостоев приведены в табл. 3.4.

Для нормирования значений  $P_{max}$ , которые не учитывают различия в архитектонике древостоя, использован показатель

$$V_0 = P_{max} / (1 - A_n). \quad (3.37)$$

**Коэффициенты ажурности полога различных пород древостоя [205]**

Вид растения	Сомкнутость крон							
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
Сосна обыкновенная	0.32	0.388	0.456	0.524	0.592	0.66	0.728	0.796
Ель обыкновенная	0.05	0.145	0.245	0.335	0.43	0.525	0.62	0.715
Лиственница европейская	0.31	0.379	0.448	0.517	0.586	0.655	0.724	0.793
Береза бородавчатая	0.30	0.37	0.44	0.51	0.56	0.65	0.72	0.79
Осина	0.38	0.442	0.504	0.567	0.63	0.69	0.752	0.815
Ольха	0.25	0.325	0.40	0.475	0.55	0.625	0.70	0.775

С учетом работы [148] были получены формулы для определения количества проникшей под полог леса дождевой влаги.

Для ели и других пород с конусообразной формой:

$$\text{при } P \leq 3V_0 \quad P_{sl} = A_n P + (1 - A_n)(0.333 P^2 / V_0 - 0.037 P^3 / V_0^2), \quad (3.38)$$

$$\text{при } P > 3V_0 \quad P_{sl} = P - (1 - A_n)V_0; \quad (3.39)$$

для сосны:

$$\text{при } P \leq 1.5V_0 \quad P_{sl} = A_n P + 0.148(1 - A_n)P^3 / V_0^2, \quad (3.40)$$

$$\text{при } P > 1.5V_0 \quad P_{sl} = P - (1 - A_n)V_0; \quad (3.41)$$

для березы, дуба, граба:

$$\text{при } P \leq 1.2V_0 \quad P_{sl} = A_n P + 0.116(1 - A_n)P^3 / V_0^2, \quad (3.42)$$

$$\text{при } P > 1.2V_0 \quad P_{sl} = P - (1 - A_n)V_0. \quad (3.43)$$

Проверки этих формул, выполненные авторами, а также проверка С. Ф. Федоровым формулы Г. Ф. Хильми [194], свидетельствуют об удовлетворительном соответствии между расчетными и измеренными величинами. Однако достаточно большое число параметров и сложность их определения сдерживают использование формул в практике. Кроме того, идеализированная схема равномерного распределения осадков над лесом при любой сомкнутости крон может не соответствовать действительности из-за наличия аэродинамического эффекта и экранирующего действия стены леса, окружающей прогалину [194]. Структурами данных формул рассматривается только отвесное падение капель, тогда как в реальных условиях их траектория в большинстве случаев может отличаться от вертикальной. Это, по мнению С. Ф. Федорова, приводит к неравенству между вычисленными и измеренными величинами задержанных осадков. Поэтому можно ожидать, что учет неравно-

мерности насыщения крон, усложняющий расчетную схему и требующий наличия трудноопределяемых параметров, не будет подкреплен повышением точности расчета. В связи с вышеприведенным, в практике для определения количества задержанных (пропущенных) пологом леса осадков используются более простые зависимости.

Часто применяются зависимости экспоненциального вида [30, 44, 85]. К таким относится формула Ю. Б. Виноградова [30], основанная на том, что приращение смоченной части удельной поверхности фитомассы, соответствующее приращению слоя осадков, убывает пропорционально этой поверхности

$$P_{il} = P_{max}(1 - \exp(-P/P_{max})). \quad (3.44)$$

Изменение задержания осадков с приращением фитомассы, вызванное изменением сомкнутости крон и мощности кронового пространства, зависит от породы древостоя, поэтому в работе [85] расчетная зависимость была представлена в следующем виде:

$$P_{il} = P_{max} (1 - \exp(-k_l P)), \quad (3.45)$$

где  $P$  – количество осадков над лесом, мм;  $P_{il}$  – величина задержанных осадков от единичного дождя, мм.

Формула (3.45) в преобразованном для расчета испарения задержанных осадков виде была приведена выше (3.20). Максимальная емкость кроны ( $P_{max}$ ) определяется по (3.21). Следует отметить, что параметры формулы (3.45) получены нами при обобщении опубликованных данных наблюдений в различных типах леса [7, 8, 61, 112, 128, 163, 209]. Значение удельной емкости насыщения ( $p$  из (3.21) для каждой из пород (для сосны, ели и березы соответственно 0.35, 0.28 и 0.45 мм/т) было определено как отношение величины задержанных осадков при полном увлажнении полога к массе листвы. При таком определении влагоемкость листвы получается завышенной, так как включает влагу, затраченную на смачивание всей кроны и ствола. Видимо, это является одной из причин того, что рассчитанная по данным Д. П. Лохова [109] удельная влагоемкость хвои сосны и ели и листьев березы получилась меньше (хвоя сосны – 0.10, ели – 0.15, листва березы – 0.14 мм/т), чем приведенные выше значения.

В работе [248] задержание влаги на кронах до их насыщения описывается следующей зависимостью:

$$P_{il} = p_1 P, \quad (3.46)$$

$$p_1 = 1 - (0.5)^{LAI}. \quad (3.47)$$

Для случаев, когда осадки превышают величину насыщения полога леса, применяется зависимость, близкая к (3.21):

$$P_{il} = P_{max} = k_l LAI, \quad (3.48)$$

где  $k_l$  – количество осадков, задержанных единицей листовой поверхности, мм/га.

В некоторых как зарубежных, так и отечественных работах [58, 222, 234] количество задержанных осадков до насыщения полога леса влагой приравнивается к величине выпавших осадков:

$$P_{il} = P \quad \text{при } P = P_{max}. \quad (3.49)$$

В этом случае принимается, что насыщение крон влагой происходит при выпадении количества осадков, равного емкости насыщения для данного древостоя. Максимальное количество задержанной влаги определялось по зависимости (3.48) [234]. Однако многими исследованиями в России показано, что для полного насыщения крон требуется значительно большее количество осадков, в 2–3 раза превышающее их емкость.

В этих упрощенных эмпирических зависимостях (3.44)–(3.49) влияние неравномерности кронового пространства и сомкнутости крон на количество задержанной влаги приближенно учитывается параметрами, осредненными для тех условий, при которых проводились наблюдения.

Большая часть задержанной пологом леса влаги от одного дождя в теплый период года испаряется. Это дает основание в отдельных случаях приравнивать величину испарения осадков с крон после дождя к количеству задержанной в кроновом пространстве влаги. Однако полное испарение этой влаги может наблюдаться только при определенных, благоприятствующих этому процессу погодных условиях. Часть капелек воды может срывать с крон, особенно при усилении ветра, и достигать поверхности земли. Частично это явление учитывается в параметрах, которые определялись по данным наблюдений, относящимся к различным, в том числе и по скорости ветра, погодным условиям. Существенные расхождения между величинами задержанной и испарившейся влаги могут наблюдаться при коротком периоде между смежными дождями, когда задержанная от предшествующего дождя влага не

успевают полностью испариться. Поэтому во многих работах эти два процесса оцениваются отдельно [234].

При расчете испарения задержанных пологом елового леса осадков в работе [234] принималось, что при наличии влаги на кроне вся поглощаемая солнечная энергия будет затрачиваться на ее испарение:

$$E_{il} = B_V / L. \quad (3.50)$$

Наиболее часто для расчета этой части суммарного испарения во многих странах используются подходы, заложенные в методе Пенмана-Монтейса [248]. Следует отметить, что с использованием этого метода определяют испарение задержанных атмосферных осадков луговой и сельскохозяйственной растительностью [230].

Испарение задержанной кронами влаги определяют также методом температурных коэффициентов [248]:

$$E_{il} = K_{tem} T, \quad (3.51)$$

где  $T$  – температура воздуха, °C;  $K_{tem}$  – температурный коэффициент, мм/°C.

Среднегодовое значение  $K_{tem}$  в данной работе принималось равным 0.16 мм/°C. В течение года месячные величины  $K_{tem}$  корректировались, в результате чего диапазон изменений  $K_{tem}$  составлял от 0.11 для холодного сезона года и до 0.26 для теплого периода [248].

### 3.2.2. Усредненная величина испарения осадков с полога леса за теплый сезон

Полученные для продолжительных периодов (месяц, сезон, год) величины задержанных кронами деревьев осадков составляют часть суммарного испарения. Уравнения для расчета усредненной величины испарения жидких осадков с крон за месяц, сезон и год были получены многими исследователями. Для темнохвойного древостоя Сибири В. В. Протопопов [156] получил логарифмическую зависимость относительной величины испарения от массы хвои:

$$E_{ilr\%} = 100E_i / P = 31.9 \lg m_d - 31.8, \quad (3.52)$$

где  $E_{ilr\%}$  – доля осадков, испарившихся с полога леса, %;  $m_d$  – масса сухой хвои, ц/га.

Для березовых лесов Красноярского края расчетное уравнение было предложено А. И. Грибовым [55]:

$$E_{itr\%} = 100E_i / P = 21.5 (\lg m_c - 1), \quad (3.53)$$

где  $m_c$  – масса сухой кроны, ц/га.

О. И. Крестовским [92, 98] было предложено простое соотношение для расчета испарения жидких и твердых осадков с крон различного по породному составу древостоя:

$$E_i = a m P, \quad (3.54)$$

где  $E_i$  – величина годового испарения с полога леса, мм;  $m$  – масса хвои (листвы) в сыром виде, т/га;  $a = 0.0115$  (для сосны, ели) и  $a = 0.025$  (для березы в теплый период).

Эту формулу О. И. Крестовский предлагает для определения испарения за год, сезон или месяц. Величину испарения снега с крон лиственного древостоя О. И. Крестовский рекомендует принимать равной 1% от количества зимних осадков.

Приведенные значения коэффициента  $a$  были получены и апробированы О. И. Крестовским в условиях южной подзоны тайги. Можно предполагать, что вариация среднесезонной и среднегодовой величины  $a$  в лесах с равными таксационными показателями обуславливается различием метеорологических характеристик. К основным из этих характеристик относят испаряемость и распределение частоты выпадения в течение периода наблюдений в исследуемом районе различных по величине дождей [112, 156]. Последнее, по мнению А. А. Лучшева, является основным климатическим фактором, обуславливающим количество задерживаемых осадков [112]. Предполагается, что возрастание в расчетном периоде доли числа дождей малой величины приводит к увеличению относительного значения задержанных осадков, а, следовательно, и к увеличению их потерь на испарение.

Влияние временной изменчивости повторяемости выпадения различных по величине дождей на количество задержанных осадков за теплый сезон (май–сентябрь) было оценено с использованием данных наблюдений на метеостанции Пряжа (южная Карелия) [85]. Задержание пологом леса осадков моделировалось с применением нескольких эмпирических формул, в том числе и (3.45), (3.21). Для оценки влияния пространственной изменчивости рассматриваемого фактора на задержание осадков пологом леса

использовались данные 60 метеостанций бывшего СССР, расположенные в разных климатических условиях [186]. Расчеты производились для различных по породному составу и запасам листвы лесов [85].

Наибольшие изменения расчетных значений наблюдаются между месячными величинами в теплый период. В частности, для соснового леса с массой хвои 10 т/га размах колебаний относительных величин осадков, задержанных кронами, за 20 лет в каждом из месяцев периода май–август составляет около 13% ( $C_v = 0.11$ ). Размах колебаний этих же значений за весь вегетационный период (май–сентябрь) каждого расчетного года составляет только 9% ( $C_v = 0.10$ ).

Расчеты относительной величины осадков, задержанных кронами деревьев, по среднеголетним данным повторяемости выпадения различных по величине дождей для станций, расположенных в различных регионах бывшего Союза, показали, что амплитуда колебаний вычисленных значений не превышает 3%, а коэффициент вариации составил 0.04. Для территории ЕСР, включающей северную, среднюю и южную подзоны тайги, разница оцениваемых величин между станциями не превышает 1%. Полученные расхождения соответствуют точности измерения осадков [125], и их низкие значения обусловлены тем, что в пределах таежной зоны среднеголетний характер распределения частоты выпадения дождей разной величины мало меняется.

С использованием рядов месячных и сезонных величин задержанных осадков, полученных путем моделирования для конкретной метеостанции, определялась необходимая продолжительность наблюдений ( $n$ ) по формуле [43]:

$$n = t^2 \sigma^2 / \delta^2, \quad (3.55)$$

где  $t$  – аргумент функции Лапласа;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $\delta$  – оценка точности.

Оценку точности можно принять равной размаху расчетного ряда относительных величин перехваченных пологом леса осадков в 60 пунктах бывшего СССР (3%), что составляет около 10% от средней величины жидких осадков, задержанных зрелыми высокополотными хвойными лесами. В этом случае при доверительной вероятности в 95% получаем, что минимальный период для

наблюдений за жидкими осадками должен составлять 7 лет. При меньшем периоде рассматриваемая величина в большей степени определяется погодными условиями отдельных лет и не является характерной для данных насаждений и климатических условий. Поэтому расхождения относительных величин задержанных осадков в лесах с равными таксационными и биометрическими показателями часто можно объяснить точностью наблюдений и короткой продолжительностью наблюдений за осадками, не превышающей 3–4 лет [85].

Один из основных аспектов проявления испаряемости в величине задержанных кронами деревьев осадков – достаточность продолжительности бездождевого периода для «обсыхания» крон. Это оценивалось по опубликованным в [61] данным наблюдений с помощью анализа зависимостей между количеством задержанных кронами деревьев осадков и относительной величиной выпавших осадков с интервалом в одни сутки, а также дефицитом влажности воздуха. Выполненные исследования подтвердили сделанные ранее А. А. Лучшевым [112] выводы о незначительном влиянии факторов испарения на количество перехваченных пологом леса осадков. Подтверждением этих результатов может служить и распределение по месяцам количества осадков под пологом сосняков разных типов, произрастающих в Карелии, по среднемноголетним данным Г. В. Ерукова и Г. В. Власковой (табл. 3.5 [61]):

Таблица 3.5

**Относительная величина осадков, пропущенных под полог различных типов сосняков, % [61]**

Тип леса	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
С. вересковый	81.1	79.0	76.6	66.9
С. брусничный	78.0	77.3	75.3	66.9
С. черничный (свежий)	75.9	74.8	75.8	66.6
С. черничный (влажный)	81.7	82.0	82.0	77.0
С. багульниково-сфагновый	88.8	86.2	86.2	79.7

В период проводимых наблюдений наибольшая доля осадков задерживалась пологом леса в сентябре. Испаряемость в этом месяце составляет 30–50% от величины летних месяцев, следовательно, этот фактор не является основным, определяющим количество

задержанных кронами деревьев осадков, и данные результаты объясняются особенностями распределения по месяцам повторяемости различных по величине дождей и характером их выпадения. В сентябре наблюдается снижение повторяемости ливней ( $> 20.0$  мм) и некоторое возрастание дождей величиной менее 5.0 мм.

Незначительное влияние испаряемости на задержание кронами осадков можно объяснить особенностями распределения во времени различных по величине дождей. В среднем 30% всего числа дождей не превышают 1 мм, а 70% – менее 5.0 мм. Расчеты и наблюдения различных исследователей показывают, что при выпадении осадков  $< 1$  мм на кронах остается не более 0.4 мм. Эта влага задерживается в основном внешней частью кронового пространства. В связи с этим, а также вследствие ее малого количества эта влага быстро испаряется, поэтому она не уменьшает емкости крон и не влияет на задерживаемую долю влаги от следующего дождя. Наибольшее число составляют осадки величиной от 1 до 5 мм. Такое распределение характерно для всех регионов, меняется только абсолютное число дождей. Дожди данной величины оставляют на кронах высокопродуктивных лесов в основном около 1 мм, что составляет не более 30% от всей емкости насыщения. В летний период эта влага испаряется в среднем за несколько часов, и даже при самых неблагоприятных погодных условиях через сутки она практически не повлияет на задержание осадков от последующего дождя.

С увеличением влаги в кронах вероятность ее возможного испарения за бездождевой период, естественно, снижается. Кроме того, уменьшается свободная емкость крон, которая снижает влияние предшествующего дождя на величину задержания даже при самых неблагоприятных условиях (продолжительность бездождевого периода недостаточна для обсыхания крон). Поэтому последовательность выпадения дождей разной величины также может влиять на общее количество перехваченных пологом леса осадков. Наиболее вероятно выпадение двух дождей подряд величиной не более 5 мм ( $P = 50\%$ ), вероятность двукратной повторности дождей большей величины не превышает 10%.

Следовательно, для значительной части теплого периода испаряемость, а также продолжительность бездождевого периода,

видимо, не оказывают заметного влияния на величину задержанных лесом осадков.

На задержание атмосферных осадков, несомненно, влияет и конденсационная влага, однако для получения ее количественной оценки необходимы специальные экспериментальные исследования.

Приведенные результаты показывают, что кроны лесов с одинаковыми таксационными и биометрическими показателями в различных регионах бывшего СССР задерживают практически одинаковую долю выпавших осадков (расхождения не превышают 3%). Основываясь на этом выводе, были построены зависимости  $E_{ir} = f(m)$  с использованием опубликованных данных наблюдений в различных типах леса и климатических условиях [7, 41, 55, 61, 112, 128, 163, 194, 209, 212] (рис. 3.5).

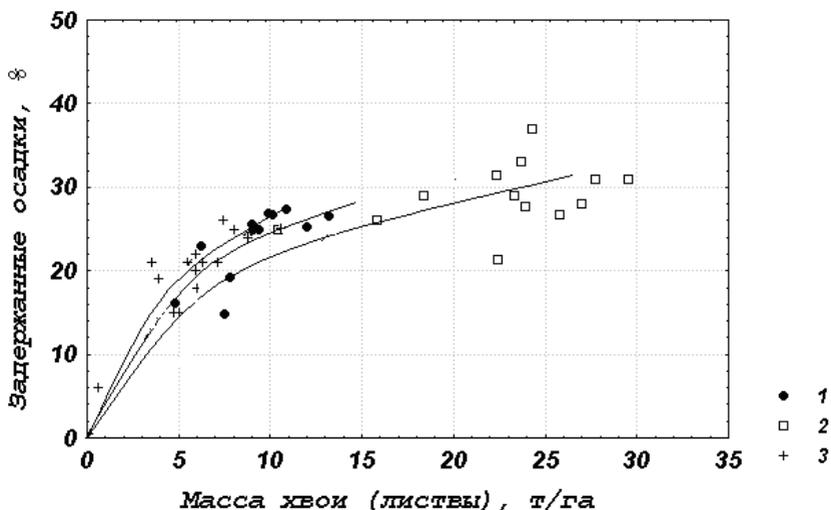


Рис. 3.5. Зависимость относительной величины испарения (относительно выпавших осадков) задержанных пологом леса жидких осадков от массы хвои (листвы) (1 – сосновым лесом, 2 – еловым лесом и 3 – березовым лесом)

Данные связи можно описать логарифмическими регрессионными уравнениями, что имеет теоретическое обоснование. Можно утверждать, что приращение количества задержанных осадков прямо пропорционально приращению фитомассы. Очевидно, что при равной величине дождя наибольшее возрастание задержанных

осадков с приращением фитомассы будет наблюдаться в том случае, когда вследствие этого дождя полог леса насыщается влагой. Так как интенсивность около 70% числа дождей не превышает 5 мм, то в большинстве случаев заполнение емкости насыщения кроны может наблюдаться только при малых запасах фитомассы. Следовательно, с увеличением массы хвои (листвы) изменение как абсолютного, так и относительного количества задержанных кронами древостоя осадков будет снижаться. Для таких рассуждений справедливо следующее равенство:

$$dE_{ilr} = k dm / m, \quad (3.56)$$

где  $dE_{ilr}$ ,  $dm$  – приращения относительной величины задержанных кронами древостоя осадков и фитомассы;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Решая дифференциальное уравнение (3.56), получаем общий вид зависимости для определения относительной величины задержания осадков:

$$E_{ilr} = k \ln m + C. \quad (3.57)$$

Для практического использования это уравнение представлено в следующем виде:

$$E_{ilr\%} = k \ln(m+1), \quad (3.58)$$

где  $E_{ilr\%}$  – относительная величина задержанных кронами деревьев жидких осадков, %;  $k$  – коэффициент, равный для сосняка, ельника и березняка соответственно 10.5, 10.0 и 10.8.

Для определения абсолютной величины задержанных пологом леса и испарившихся жидких осадков формулу (3.58) удобнее представить в виде:

$$E_{il} = k_{Ei} P \ln(m+1), \quad (3.58^1)$$

где  $E_{il}$  – количество задержанных кронами деревьев жидких осадков, мм;  $k_{Ei}$  – коэффициент, равный для сосняка, ельника и березняка соответственно 0.105, 0.100 и 0.108.

Следует отметить, что логарифмический вид имеют и формулы В. В. Протопопова (3.52) и А. И. Грибова (3.53).

Сравнительно тесные связи, особенно для березняков и сосняков, подтверждают сделанные выше выводы о незначительном влиянии испарения и при достаточно продолжительном периоде наблюдений распределения повторяемости дождей различной величины на относительное количество задержанных пологом леса

осадков. Влияние этих факторов проявляется в меньшей степени, чем масса листвы, которая и определяет изменчивость  $E_i$ . Отклонения отдельных точек от общей тенденции (рис. 3.5) может объясняться также точностью определения массы хвои.

Из уравнений (3.58) и (3.45) следует, что наименьшее количество влаги задерживается единицей массы хвои ели, а наибольшее – листьев березы. Это согласуется с величинами переходного коэффициента ( $k_i$ ) в формуле (1.13), значения которого соответствуют удельной поверхности хвои (листвы) различных пород древостоя.

Расчеты по формулам (3.52)–(3.54), (3.58) показывают, что результаты по (3.52) и (3.58), а также по (3.53) и (3.58) хорошо согласуются между собой при наиболее часто встречающихся запасах фитомассы (табл. 3.6).

Таблица 3.6

**Расчетные величины задержанных кронами древостоев жидких осадков, % от общего количества выпавших**

Порода	Формула	Вес сырой хвои (листвы), т/га								
		2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	25.0
Сосна	(3.54)	3	6	9	12	14	17	20	23	
	(3.58)	13	18	22	25	27	29	31	32	
Ель	(3.54)	3	6	9	12	14	17	20	23	29
	(3.52)	3	13	19	23	26	28	30	32	35
	(3.58)	12	18	21	24	26	28	29	30	33
Береза	(3.54)	6	12	18	25					
	(3.53)	12	20	26	31					
	(3.58)	14	19	23	26					

Более значительные расхождения, особенно при малых запасах фитомассы, получены при расчетах по формулам (3.54) и (3.58). В первую очередь, это, по-видимому, объясняется различиями в структурах формул. В определенной степени расхождения могут быть связаны с различиями в методах определения массы хвои и листвы. Вместе с тем, при оценке влияния хозяйственной деятельности в лесу на водные ресурсы с использованием этих формул для определения испарения задержанных кронами древостоя осадков данные расхождения могут оказаться принципиальными. Поэтому исследования по уточнению методов расчета рассматриваемой доли суммарного испарения лесом имеют важное значение.

Формулы (3.58) и (3.58<sup>1</sup>) наиболее обоснованы данными наблюдений, охватывающими большую территорию бывшего СССР, поэтому при расчетах с их использованием можно рассчитывать на более точные результаты.

### 3.2.3. Испарение твердых атмосферных осадков с полога хвойного леса

Для определения испарения со снега за месяц и сезон конкретного года, а также его среднемноголетней величины за эти же периоды при отсутствии детальных метеорологических наблюдений используется в настоящее время формула [160]:

$$E_g = 0.37 d n, \quad (3.59)$$

где  $d$  – дефицит влажности воздуха гПа;  $n$  – продолжительность расчетного периода, сут.

В данном виде формула применяется, как известно, для определения испарения с открытых участков. По утверждению ряда исследователей, зимнее суммарное испарение с хвойного леса выше, чем с поля. Эта разница объясняется появлением дополнительного испарения с кроны деревьев [194] и учитывается, в соответствии с существующими в настоящее время рекомендациями, осредненным коэффициентом, равным 1.25 [160, 194]. Значение коэффициента, конечно, зависит от таксационных характеристик леса и поэтому принятие его постоянным для различных по полноте и запасу фитомассы насаждений снижает точность расчета.

Среднемноголетнюю величину испарения твердых осадков с кроны хвойного древостоя О. И. Крестовский, так же как и жидких осадков, предложил определять по формуле (3.54). Из этой формулы следует, что абсолютная величина испарения снега с полога леса зависит от количества выпавших осадков. Поэтому расчеты дают более высокий результат на тех водосборах, где больше выпавшего снега при равенстве других факторов. Вместе с тем, по мнению многих исследователей, в том числе и М. И. Ивероновой [65], интенсивность испарения и общая его величина за период со снежным покровом мало меняется по годам и по географическим районам. Кроме того, для большей части зимнего периода, особенно на севере России, осадки не являются лимитирующим фактором испарения с

полога леса фактором, так как чаще всего снег лежит на кронах. И даже в периоды с положительными температурами, когда снег с полога скатывается лавинами вниз, кроны остаются влажными. О слабом влиянии величины снегозапасов на испарение с леса и о некоторых показателях стабильности интенсивности испарения можно судить по зависимости отношения предвесенних запасов воды в снегу на освоенном и неосушенном залесенном болоте от относительной величины снегозапасов на освоенном болоте [76]:

$$S_{d_b} / S_b = 0.862(S_{d_b} / S_{d_{bm}})^{0.148}, \quad (3.60)$$

$S_{d_b}$  и  $S_b$  – предвесенние запасы воды в снегу на освоенном и неосушенном залесенном болоте, мм;  $S_{d_{bm}}$  – среднемноголетняя величина предвесеннего запаса воды в снегу на освоенном болоте, мм.

Зависимость (3.60) достаточно тесная: средняя квадратическая ошибка расчета равна 0.01. Полученная нами по данным наблюдений в южной Карелии на Корзинском мелиоративном стационаре она показывает, что с увеличением снегозапасов рассматриваемое отношение ( $S_{d_b}/S_b$ ) стремится к единице (при изменении  $S_{d_b}$  от 66 до 223 мм, отношение  $S_{d_b}/S_b$  изменяется от 0.78 до 0.93). Такой характер зависимости свидетельствует, что при всех колебаниях снегозапасов и продолжительности их формирования абсолютная величина разницы между запасами в поле и в лесу остается практически постоянной. В нашем примере она колебалась от 16 до 18 мм, при большем значении запасов воды в снегу на залесенном участке.

Снижение относительной величины задержанного кронами деревьев снега с ростом общего количества снегозапасов отмечалось и в работе И. Л. Калюжного с соавторами [78], что свидетельствует о слабой изменчивости запасов снега (при достижении некоторого уровня) в пологе леса.

В этой связи для расчета среднемноголетнего значения испарения снега с крон ( $E_{iws}$ ) более обоснованной представляется зависимость его количества от площади поверхности снега на кронах, показателем которой может служить масса хвои или листовой индекс (рис. 3.6). Для построения зависимости  $E_{iws} = f(LAI)$  нами были использованы данные наблюдений в различных регионах России, в том числе и в Карелии, за осадками и снежным покровом на открытых участках и под кронами древостоя [16, 37, 67, 131, 167, 191, 194]. Испарение с крон определялось как разница сумм осадков

за зимний период на открытых участках и под пологом леса. Для повышения достоверности этот ряд удлинялся за счет разницы измеренных в конце зимы снегозапасов в тех же ландшафтах. При анализе всей информации принималось, что определенная по наблюдениям за осадками разница в большей степени соответствует испарению с крон древостоя. Полученное уравнение имеет вид:

$$E_{iws} = 5.0 LAI. \quad (3.61)$$

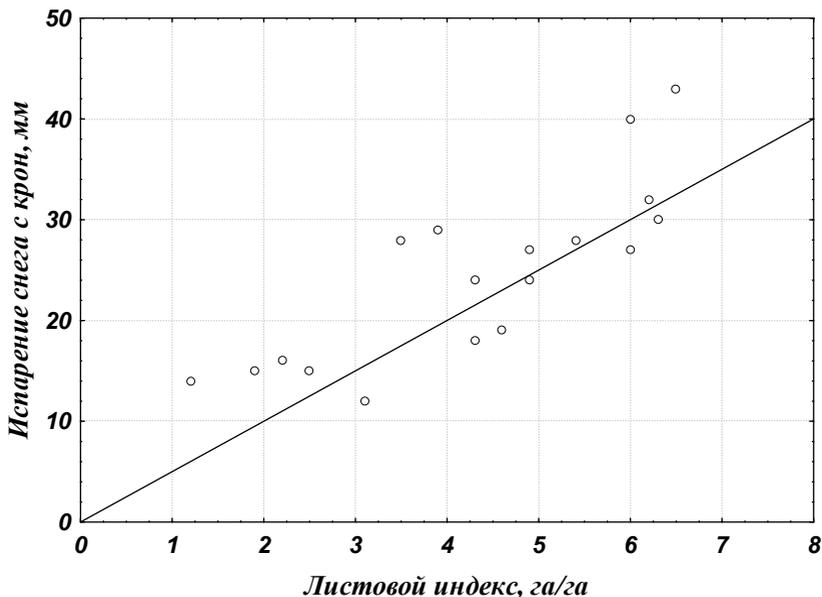


Рис. 3.6. Зависимость испарения снега с крон хвойных деревьев от листового индекса

Уравнение (3.61) следует применять для расчета среднесноголетней величины испарения снега с полога хвойного леса. При расчете этой же величины за конкретные годы необходимо учитывать метеорологические условия. Для решения данной задачи представим искомую формулу в общем виде, используя (3.59) и (3.61):

$$E_{iws} = 0.37 k d LAI n, \quad (3.62)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий различия площадей испаряющих поверхностей и метеорологических характеристик над лесом и полем.

Решая уравнение (3.62) для конкретных метеорологических условий, при которых проводились наблюдения за осадками и снежным покровом в лесу и на открытых участках, определяем значение коэффициента. В среднем величину  $k$  можно принять равной 0.18. Исходя из этого, расчетное уравнение для вычисления испарения снега с крон хвойного леса приобретает следующий вид:

$$E_{iws} = 0.065 d LAI n. \quad (3.63)$$

Формулу (3.63) можно использовать для определения испарения с крон, при наличии на них снега, за зиму и более короткие, чем сезон, интервалы. Для вычисления  $LAI$  используется соотношение (1.13), а масса хвои определяется по формуле (1.12).

При отсутствии снега на кронах, что наблюдается после оттепелей, в конце зимы при высокой интенсивности солнечной радиации, а также в переходные периоды, когда осадки выпадают в виде дождя и снега, использовать формулы (3.61) и (3.63) нельзя. В таких ситуациях следует применять формулу О. И. Крестовского (3.54) с коэффициентом  $a$ , равным 0.01. Значение этого коэффициента было нами установлено на основании анализа опубликованных данных, нужно отметить, что оно практически не отличается от принятого О. И. Крестовским.

### 3.2.4. Сравнение методов определения испарения осадков с полога леса за год

Анализ различных методов для определения усредненных за сезон величин испарения с крон древостоя жидких осадков выполнен выше (см. табл. 3.6), на основании которого был сделан вывод о возможности использования для этой цели предлагаемой в работе формулы (3.58<sup>1</sup>) и показаны ее преимущества перед другими формулами. Испарение за год с березового леса предлагается определять, используя формулу (3.58<sup>1</sup>) с соответствующим значением коэффициента для теплого периода, формулу (3.54) – для переходных периодов с  $a$ , равным 0.01. Для периода с отрицательными температурами (когда снег лежит на кронах) испарение с листового древостоя, основываясь на исследованиях О. И. Крестовского, рекомендуется принимать равным 1% от величины зимних

осадков. Годовую величину испарения осадков с полога хвойного леса следует определять в три этапа: в теплый период – с использованием формулы (3.58<sup>1</sup>) (с коэффициентом в зависимости от породы), в период, когда снег лежит на кронах, – формул (3.61) и (3.63), в переходный период испарение с хвойного леса рассчитывается так же, как и с лиственного.

Оценить величину возможных погрешностей определения испарения задержанных пологом леса осадков при использовании в практике предлагаемого в данной работе метода с некоторым приближением можно при сравнении результатов расчета по анализируемому и по другим методам. В качестве альтернативного был принят метод О. И. Крестовского, в соответствии с которым годовая величина испарения с полога леса определяется по (3.54). Сравнение этих методов проводилось на примере сосняка брусничного для условий среднетаежной подзоны. Результаты расчетов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Годовое испарение осадков с полога соснового леса, определенное различными методами**

Возраст, лет	Состав	Высота, м	Запас древесины, м <sup>3</sup> /га	Масса хвои, т/га	Листовой индекс, га/га	$E_{i1}$ , мм	$E_{i2}$ , мм
22	10С	4.0	35	5.79	2.03	46	84
32	10С	5.8	78	9.57	3.35	76	110
42	10С	7.8	160	7.51	2.63	59	96
44	10С	8.2	128	12.4	4.34	98	126
54	10С	12.6	254	10.0	3.50	79	113
71	10С	14.3	256	12.2	4.27	97	125
76	10С	18.8	361	12.7	4.44	100	128
84	10С	17.7	371	11.8	4.13	93	123
85	10С	19.3	370	9.21	3.22	73	108
109	10С	20.4	393	11.3	3.96	89	120
122	10С	22.7	447	11.4	3.99	90	121
123	10С	21.9	424	12.2	4.27	96	125
146	10С	22.3	441	11.1	3.88	88	119
185	10С	23.7	440	10.9	3.82	86	118
Среднее		15.7	297	10.6	3.70	84	116

Примечание.  $E_{i1}$  – результаты расчета по методу О. И. Крестовского,  $E_{i2}$  – результаты расчета по методу авторов.

Результаты расчета по формуле О. И. Крестовского оказались ниже, чем по нашему методу (табл. 3.7). В среднем разница составляет 32 мм, а наибольшие относительные ошибки отмечаются в молодом древостое. По отношению к годовому суммарному испарению с леса эта разница составляет 6–9%, что не выходит за пределы влияния на эту ошибку точности определения таксационных характеристик леса. Однако с нашей точки зрения, второй метод теоретически более обоснован, как это было показано выше и в предыдущих работах [85, 87], поэтому при выполнении дальнейших расчетов, связанных с определением испарения осадков с полога леса, ему отдается предпочтение.

### **3.3. Испарение под пологом леса**

Основными факторами, обуславливающими величину испарения под пологом леса в теплый период, являются тип леса и его географическое положение. В понятие «тип леса» входят, как это показано в разделе 1.3, такие показатели, как плодородие почвогрунтов, состав и продуктивность древостоя, сомкнутость или ажурность его полога, определяющие количество поступающей под полог леса солнечной радиации и, в конечном итоге, вид наземного покрова. Географическое положение леса определяет общую величину поступления солнечной энергии, плодородие почвогрунтов и изменчивость продуктивности древостоя даже в пределах одного типа.

Относительное испарение (по отношению к испарению с луга) каждого вида наземной растительности О. И. Крестовский [92] принимал за постоянную величину, используя обобщенные данные большого количества натуральных исследований в различных регионах. Возможность такого подхода подтверждается С. Ф. Федоровым, который отметил постоянство значений испарения с отдельных видов наземного покрова по данным различных исследователей [194]. Суммарную величину испарения с почвы и напочвенного покрова для конкретного леса за теплый период года О. И. Крестовский определял как средневзвешенное значение с учетом всего разнообразия напочвенного покрова и проективного

покрытия представленных там растений. В работе [92] даны рекомендации к практическому использованию предлагаемого метода.

К недостаткам такого подхода следует отнести то, что определение видов растений в наземном покрове и их проективного покрытия выполняется только на экспериментальных участках. Вместе с тем в видовом разнообразии, и особенно в проективном покрытии, отдельными растениями отмечаются вариации даже в пределах одного и того же типа леса. Поэтому распространение результатов расчета испарения с наземного покрова, полученных по данным для конкретных экспериментальных участков, на водосборы в целом может привести к заметным погрешностям. Кроме того, растения характеризуются высокими значениями экологической амплитуды и одни и те же виды растительности могут произрастать в достаточно широком диапазоне метеорологических условий, в том числе и освещенности. Однако при сохранении индивидуальностей, с изменением условий среды меняются биофизические характеристики и интенсивность транспирации. Данный вывод мы делаем на основании исследований, выполненных для древесных растений. В частности, для ели это показано в работах [29, 133]. Уменьшение транспирации хвои сосны от верхней части кроны к нижней из-за снижения освещенности отмечает С. Н. Сенькина [174].

Одним из наиболее теоретически обоснованных и часто используемых для определения испарения с сельскохозяйственных полей и болот является теплобалансовый метод. Такой подход для определения испарения и под пологом леса применялся в исследованиях Ю. Л. Раунера [158]. Им было предложено простое выражение:

$$E_s = \alpha B/L, \quad (3.64)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;  $B$  – остаточный член уравнения теплового баланса.

По результатам исследований Ю. Л. Раунера,  $\alpha$  меняется в зависимости от типа леса и условий увлажнения от 0.8 до 1.0. В основном лесу на песчаных почвах  $\alpha = 0.85$ , при оптимальном увлажнении в лиственном лесу  $\alpha = 1.0$ , на участках с густыми посадками клена при плотном листовом опаде  $\alpha = 0.8$ .

Однако применение метода Ю. Л. Раунера для расчета рассматриваемой части суммарного испарения с леса сдерживается отсутствием сетевых данных о радиационном режиме под кронами древостоя и надежного метода его расчета. Для определения испарения по (3.64) остаточный член уравнения радиационного баланса при отсутствии измеренных данных можно определять из уравнения радиационного баланса:

$$B = Q_s (1 - A) - I, \quad (3.65)$$

где  $Q_s$  – поступающая суммарная солнечная радиация;  $A$  – альbedo;  $I$  – эффективное излучение.

Определение с необходимой точностью всех входящих в уравнение радиационного баланса членов представляет для условий леса в большинстве случаев непреодолимую трудность. В теплый период времени для большей части естественных поверхностей поступающая радиация является наиболее весомой величиной радиационного баланса. Поэтому при определении  $B$  часто используют простое выражение:

$$B = a Q_s + b. \quad (3.66)$$

Коэффициенты регрессии  $a$  и  $b$  зависят от вида подстилающей поверхности. Так как вид наземного покрова определяется типом леса, то можно предполагать, что коэффициенты в каждом из них относительно постоянны. По данным, приведенным в работе [178], нами получены достаточно тесные связи  $B = f(Q_s)$  для отдельных типов леса. Полученные коэффициенты приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

**Значение коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (3.66) для некоторых типов леса**

Тип леса	$a$	$b$
Сосняк вересковый	0.59	-1.4
Сосняк багульниковый	0.23	-0.08
Сосняк вересково-мшистый	0.38	-0.06
Сосняк лишайниковый	0.44	0.06
Ельник мшисто-кисличный	0.73	-0.21
Ельник чернично-мшистый	0.16	-0.025

В среднем для сосновых лесов  $a = 0.41$ ,  $b = -0.37$ , для еловых –  $a = 0.44$  и  $b = -0.12$ .

Существующие в настоящее время методы для определения количества солнечной радиации, проникающей через растительный покров, базируются на известной формуле [158, 205]:

$$Q_{sv} = Q_s \exp(-\alpha LAI), \quad (3.67)$$

где  $Q_{sv}$  и  $Q_s$  – величины проникающей сквозь листву и поступающей к верхней границе крон суммарной солнечной радиации.

Эта формула используется при решении различных задач, связанных с проникновением солнечной радиации через крону древо-стоя [158, 205]. К ее недостаткам относят то, что в ней не учитывается горизонтальная неоднородность фитоценозов, зависимость проникающей радиации от высоты Солнца, ориентации и угла наклона пластинки листа. В дальнейшем рядом исследователей было показано, что при определении радиации, проникающей на тот или иной горизонтальный уровень внутри растительного покрова, возникают ошибки, обусловленные изменением коэффициента экстинкции  $\alpha$  по вертикали. Снижение этих ошибок достигается введением дополнительных параметров [158]:

$$Q_{sv} = Q_s \exp(-\beta LAI^n), \quad (3.68)$$

где  $\beta$  и  $n$  – параметры, которые зависят от оптических свойств элементов фитомассы и их распределения в кроновом пространстве.

Уменьшение погрешностей расчета получают также при удлинении временного шага. Для расчета среднего между поступающим и проникающим под кроны деревьев количеством лучистой энергии за сутки в работе [234] предложена формула:

$$Q_{svm} = Q_s (1 - \exp(-k LAI))/k LAI, \quad (3.69)$$

где  $k$  – параметр экстинкции ( $k = 0.5$ ).

Для определения суточного значения  $Q_{sv}$  на основании обработки опубликованных данных наблюдений, в том числе и в Карелии [1, 42, 178, 189], нами было получено эмпирическое уравнение:

$$Q_{sv} = Q_s \exp(-0.13 m). \quad (3.70)$$

С учетом переходного коэффициента от массы хвои к листовому индексу (уравнение (1.13) характеристику листового аппарата в уравнении (3.70) можно заменить. В этом случае искомое уравнение приобретает вид:

$$Q_{sv} = Q_s \exp(-0.4 LAI). \quad (3.71)$$

Следует отметить, что коэффициенты экстинкции в эмпирических формулах (3.71) и (3.23), характеризующие снижение проникающей сквозь полог леса солнечной энергии в первом случае и снижение кронами величины возможного испарения во втором случае, с увеличением относительной площади листовой поверхности, равны. Это равенство вполне объяснимо, так как солнечная радиация является одним из основных факторов состояния растительного покрова, его видового разнообразия и испарения. Следовательно, изменение испарения под кронами древостоя должно соответствовать изменению поступления солнечной радиации. Поэтому равенство коэффициентов в данном случае можно рассматривать как подтверждение их достоверности, поскольку получены они были в различных условиях.

Изложенное выше предполагает возможность использования для определения испарения с наземного покрова за год близкую по структуре (3.23) и (3.71) следующую эмпирическую формулу:

$$E_s = E_0 k \exp(-l m), \quad (3.72)$$

где  $E_0$  – испаряемость, мм;  $k$ ,  $l$  – коэффициенты регрессии, равные 0.77, 0.114 и 0.85, 0.069 соответственно для соснового и елового лесов.

Выражение (3.72) с указанными коэффициентами предназначено для определения годовой величины испарения под кронами деревьев. Коэффициент  $k$  показывает, что даже если масса листового аппарата равна нулю, то испарение с наземного покрова будет меньше испаряемости, как это и подтверждается натурными измерениями на вырубках.

С использованием листового индекса в качестве характеристики густоты полога леса формула (3.72) принимает следующий вид:

$$E_s = 0.8E_0 \exp(-0.3 LAI). \quad (3.73)$$

Формула (3.73) может применяться для определения испарения за год с наземного покрова леса независимо от его породного состава при наличии данных о листовом индексе.

При решении некоторых гидрологических задач, например, расчета внутригодового распределения стока реки, необходима информация о сезонном испарении, поэтому интерес представляет метод определения зимнего испарения под пологом леса. По мнению немногочисленных в данном случае исследователей, зимой и

в начале весеннего половодья под пологом леса снега испаряется примерно в 2–3 раза меньше, чем на открытых участках [101, 194]. Однако это соотношение меняется в зависимости от густоты древостоя [111, 190].

Поскольку густота древостоя влияет на испарение снега под пологом леса, то в качестве количественного фактора, определяющего это влияние, можно принять листовой индекс. В этом случае можем написать дифференциальное уравнение, устанавливающее зависимость приращения испарения от определяющих его факторов:

$$dE = -\beta E d(LAI), \quad (3.74)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности.

После преобразования и интегрирования в пределах от величины испарения с открытого участка ( $E_g$ ) до испарения под пологом леса ( $E_{sws}$ ) получаем расчетную формулу:

$$E_{sws} = E_g \exp(-\beta LAI). \quad (3.75)$$

Значение  $\beta$ , полученное по данным наблюдений С. Ф. Федорова [194] и А. А. Лучшева [111], равно 0.2.

Оценку изложенных методов выполняли для сосняка кисличного за весь период его развития после рубки – от 10 до 140 лет. Годовое испарение под пологом леса определяли по предлагаемой нами формуле (3.73) и по методу О. И. Крестовского [92]. По третьему методу испарение определялось отдельно для теплого и холодного периодов. Для теплого периода использовали метод Ю. Л. Раунера (3.64) и для холодного – нашу формулу (3.75).

При расчете испарения за теплый период коэффициент  $\alpha$  в формуле (3.64) принимали равным 0.85, величину остаточного члена уравнения радиационного баланса определяли по (3.66) с использованием средних для сосновых лесов коэффициентов ( $a = 0.41$  и  $b = -0.37$ ), а суммарную солнечную радиацию – по (3.71). Для зимнего периода испарение под кронами древостоя вычислялось по (3.75), в которой испарение с открытого участка ( $E_g$ ), где  $LAI = 0$ , определяли по (3.59). Результаты расчетов приведены в табл. 3.9.

**Расчет испарения с наземного покрова в сосняке кисличном  
различными методами**

Возраст, лет	Высота, м	Запас, м <sup>3</sup> /га	Полнота	$V$ , га/га	$E_s$ , мм	$E_{скр}$ , мм	$E_{св}$ , мм
10	5.6	48.6	0.64	2.55	167	220	154
20	10.5	114.8	0.7	3.82	114	145	95
30	14.8	177	0.73	4.07	106	108	87
40	17.6	214.2	0.73	3.94	110	108	91
50	19.8	244.7	0.73	3.77	116	96	97
60	21.5	260.9	0.71	3.51	126	96	107
70	22.9	275.9	0.7	3.31	133	100	116
80	24.0	286.4	0.69	3.22	137	110	120
90	24.9	303.1	0.7	3.32	133	110	115
100	25.9	321.6	0.71	3.32	133	115	115
110	26.7	337.7	0.72	3.32	133	120	115
120	26.9	345.3	0.73	3.35	132	125	114
130	27.2	350.8	0.73	3.38	131	134	113
140	27.3	351.1	0.73	3.37	131	140	113
Среднее	21.1	259.4	0.72	3.4	129	123	111

*Примечание.*  $E_s$  – рассчитывалось по нашей формуле (3.73);  $E_{скр}$  – по методу О. И. Крестовского [92];  $E_{св}$  – по (3.64) и по (3.75).

Приведенные расчеты свидетельствуют о приемлемости всех трех методов для расчета испарения с наземного покрова. Наибольшие расхождения в испарении для лесов молодого возраста можно объяснить низкой точностью определения листового индекса для этого возрастного периода. При определении испарения по формуле (3.73) используется наиболее доступная информация, поэтому данный метод расчета, по нашему мнению, является более привлекательным.

### 3.4. Испарение с вырубок

При сплошных рубках, которые в настоящее время являются основным способом заготовки древесины, полностью удаляется древостой, поэтому испарение с лесосеки в первый год после рубки определяется в основном влагооборотом в наземном покрове:

лесной подстилке, почве и наземной растительности. Увеличение поступления солнечной радиации, несомненно, способствует росту физического испарения влаги из почвы, с лесной подстилки, капелек влаги с растений. Однако дополнительная радиация, наряду с положительным влиянием, может угнетающе действовать на отдельные виды растений, снижая интенсивность биологических и физиологических процессов, в том числе и транспирации. Изменение этих процессов обуславливается также и преобразованием температурного режима в приземном слое воздуха, в частности, увеличением заморозкоопасности [110]. В последующие годы изменение эвапотранспирации с вырубki определяется трансформацией напочвенного покрова, интенсивностью зарастания и динамикой породного состава древесной растительности.

Процессы, которые протекают в почвенных горизонтах и растительном покрове на вырубках от момента удаления древесной растительности до ее восстановления, сложны и многофакторны. Это определяет многообразие путей лесовосстановления [142, 162]. Для северотаежной подзоны характерно незначительное изменение наземного покрова после рубки. В преобладающих в наземном покрове кустарничково-лишайниковых и кустарничково-зеленомошных ценозах изменений после рубки древостоя практически не наблюдается. Эдификаторами на таких вырубках являются лишайники и зеленые мхи [162]. Поэтому в северотаежной подзоне суммарное испарение после рубки древостоя до начала его восстановления будет определяться процессами в том же наземном покрове, который существовал до рубки. Вырубki здесь чаще зарастают материнскими породами, поэтому весь процесс лесовосстановления сопровождается плавными изменениями элементов водного баланса.

С продвижением на юг, сопровождающимся улучшением климатических и почвенных условий, увеличивается число типов вырубok и путей лесовозобновления. В условиях средней тайги на вырубках происходят существенные преобразования напочвенного покрова. Эдификаторная роль после рубок переходит от кустарничково-зеленомошных ценозов к травяным, происходит задернение вырубok, что препятствует возобновлению древостоя [162]. Чаще всего здесь первыми на вырубках появляются лиственные

породы, сменяющиеся в ходе дальнейшего развития материнскими. Все эти преобразования, несомненно, отражаются на динамике испарения.

Следует отметить, что как в северо-, так и в южнотаежной подзонах испарение с наземного покрова даже в первый год после рубок древостоя заметно увеличивается. По оценкам многих исследователей, в первый год после сплошных рубок испарение с вырубок составляет примерно 50% бывшего и окружающего леса [98, 195, 199] и вместе с тем, по мнению О. И. Крестовского [98], оно на 20–50% больше, чем было под пологом леса.

При расчете испарения с вырубок, несомненно, наиболее перспективными являются подходы, учитывающие динамику видового разнообразия и проективного покрытия растительного покрова. Решение этой задачи может основываться на существующих моделях, параметры которых связаны с биометрическими и физиологическими характеристиками сменяющих друг друга в течение периода лесовосстановления растений [103, 187], к ним относится и метод Пенмана-Монтейса [234, 239] (3.16). Однако широкое использование таких моделей в настоящее время затруднено отсутствием в большинстве случаев необходимой информации. Поэтому учесть все многообразие преобразований на вырубках от их начальных стадий до восстановления леса не представляется возможным. Кроме того, некоторую долю вырубок, что характерно для России, занимают порубочные остатки. Это также затрудняет использование указанных выше моделей. Все вместе взятое можно рассматривать как основание для применения эмпирических формул, к которым, в частности, относится зависимость относительной величины эвапотранспирации (относительно суммарного испарения со спелого леса, значение которого для исследуемых регионов близко к испарению с луга и испаряемости) от возраста вырубки. При построении этой зависимости использовались опубликованные данные, полученные в различных регионах зоны тайги [27, 37, 92, 98, 105, 156, 195, 198, 199, 208, 213]. Результаты наблюдений для каждого возраста вырубки осреднялись, и по этим данным строилась зависимость, которая является достаточно надежной (см. рис. 2.1):

$$E_{sl \tau} / E_f = 0.45 + 0.16(\ln(\tau + 1)), \quad r = 0.89, \quad (3.76)$$

где  $E_{sl \tau}$  – испарение с вырубki, возраст которой  $\tau$ , мм;  $E_f$  – испарение со спелого леса, мм;  $\tau$  – продолжительность периода после сплошной рубки, лет.

Данную зависимость при расчете испарения следует использовать в течение переходного периода до возобновления леса. Предельный возраст вырубki, для которой определяется испарение по формуле (3.76), в соответствии с вышеизложенным, следует принимать равным 15 годам. Для расчетов испарения с более старых вырубok при наличии древостоя используются методы, рекомендованные в данной работе для лесных участков. При отсутствии деревьев рекомендуются общепринятые методы определения испарения с суши [125, 160].

### **3.5. Сравнение методов определения среднемноголетней величины испарения с леса**

Впервые расчет среднемноголетней величины суммарного испарения с леса с использованием биометрических характеристик древостоя и наземной растительности был выполнен О. И. Крестовским [92, 98] при оценке влияния рубок и структуры лесного фонда на водность рек, поэтому в дальнейшем такой подход мы называем «методом Крестовского». Этот метод, дополненный нашими разработками в ИВПС КарНЦ РАН [18, 82, 85, 87], позволяет объективно подойти к оценке роли леса и деятельности человека в нем в формировании элементов водного баланса на водосборах. Об этом свидетельствует выполненное исследование, в котором оценивалось соответствие результатов расчетов, полученных предложенным в данной работе и традиционными методами.

Расчеты суммарного испарения различными методами были выполнены для 30 речных водосборов, расположенных в средней и северной подзонах тайги, на которых проводились гидрометеорологические наблюдения. Основное их количество входило в гидрометеорологическую сеть, а два водосбора относились к Корзинскому мелиоративному стационару Института биологии КарНЦ РАН. Для каждого водосбора на основании лесоустроительных работ,

выполненных в 1980-е годы, были получены данные о распределении лесного фонда по категориям земель, группам и категориям защитности лесов, данные о распределении покрытой лесом площади и запасов насаждений по преобладающим породам, классам возраста, бонитета по состоянию на 1985 год. Осредненные значения наиболее значимых для формирования элементов водного баланса характеристик приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

**Классы возраста и бонитета основных пород древостоя по осредненным для каждого водосбора значениям**

Характеристика	Сосна		Ель		Береза	
	Классы		Классы		Классы	
	возраста	бонитета	возраста	бонитета	возраста	бонитета
Средний	III.5	IV.0	IV.8	IV.0	IV.3	III.5
Максимум	V.5	V.3	IX.2	V.1	VI.6	IV.9
Минимум	II.2	III.0	II.5	II.6	I.1	II.2

Характеристики древостоя лесных участков исследуемых водосборов в достаточно полной степени отражают присущие им факторы, определяющие гидрофизические процессы в лесах Карелии. Средняя величина лесистости водосборов составляет 76% и колеблется от 29 до 94%. Основными породами являются сосна (31% площади водосборов), ель (25%) и береза (14%), среди других пород преобладают осина и ольха, на долю которых приходится менее 2%.

Средние значения испарения определялись традиционными методами и «методом Крестовского» для теплого сезона (май – октябрь) и для года. В качестве традиционных способов расчета использовались метод водного баланса для определения средней величины годового испарения и комплексный метод – для теплого сезона. «Метод Крестовского» реализовывался с нашими изменениями и дополнениями, описанными выше и в [18, 82, 85, 87].

Для расчета среднемноголетнего испарения по методу водного баланса использовалось уравнение

$$E = P - Y, \quad (3.77)$$

где  $P$  – атмосферные осадки за рассматриваемые периоды с поправками на смачивание и на ветровой недоучет, мм;  $Y$  – сток с водосбора за те же, что и осадки, периоды, мм.

Поправки на ветровой недоучет в измеренные величины осадков вводились в соответствии с рекомендациями в [186].

При расчете испарения комплексным методом критические влаготазасы метрового слоя почвы каждого месяца и на начало первого месяца теплого периода были приняты для зоны хвойных лесов согласно существующим рекомендациям [160].

Годовые и сезонные величины испарения по «методу Крестовского» определялись с помощью приведенных выше рекомендаций и уравнений.

По «методу Крестовского» испарение определялось только с лесных участков, участие в расходовании влаги на испарение остальных угодий, доля площади которых, без учета вырубок, в среднем не превышала 24%, вычислялось по среднееголетним значениям с помощью карт [32, 161]. Доля годового испарения, приходящаяся на теплый период, для территории Карелии была принята равной 0.844 согласно [161]. Итоговое испарение с водосбора определялось как средневзвешенное по площади испарение с леса и безлесных территорий. Результаты расчетов приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

**Суммарное испарение с речных водосборов, мм**

Характеристика	Год		Теплый период (V–X)	
	Методы		Методы	
	Водного баланса	Крестовского	Комплексный	Крестовского
Среднее	374	377	323	329
Максимум	558	410	381	368
Минимум	195	304	273	257

Учитывая невысокую точность вычисления как элементов водного баланса, так и фитомассы, можно отметить хорошее соответствие между значениями испарения, определенными разными методами, за каждый из расчетных периодов. При вычислении годовых величин неоправданно большой разброс точек получен по уравнению водного баланса (см. табл. 3.11), что, по-видимому, объясняется низкой точностью определения зимних атмосферных осадков. Следовательно, метод определения среднееголетнего годового испарения по биометрическим характеристикам, который мы называем методом Крестовского, можно использовать при решении различных гидрологических задач.

## **4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА В ЛЕСАХ**

Исследование особенностей формирования элементов водного баланса в лесу как на основе моделирования, с использованием описанных выше методов расчета таксационных характеристик и испарения, так и с помощью измеренных в различных условиях осадков, снежного покрова, водно-физических свойств почвогрунтов имеет важное значение. С одной стороны, оно пополняет знания о роли растительного покрова в трансформации осадков и солнечной энергии. С другой, не менее важной в данном случае, стороны, роль исследования заключается в том, что детальное рассмотрение режима испарения и стока в сопоставлении с изменением в процессе роста древостоя таксационных характеристик позволяет хотя бы косвенно оценить достоверность существующих и предлагаемых в этой работе расчетных методов тех элементов водного баланса, экспериментальное определение которых в лесу практически невозможно.

### **4.1. Испарение с леса**

#### **4.1.1. Возрастная динамика транспирации и суммарного испарения с леса и влияние на нее лесорастительных условий и продуктивности древостоя**

Влияние возраста древостоя на его транспирацию и суммарное испарение с леса отмечалось в работах многих исследователей. Большое внимание этому вопросу уделялось А. А. Молчановым [128].

Детальные исследования данной проблемы проводились в Государственном гидрологическом институте [98, 200]. О. И. Крестовский представлял возрастную динамику испарения с эксплуатируемых лесов важным фактором, создающим сложность в исследовании гидрологической роли лесов и объясняющим многие существовавшие противоречивые оценки влияния леса на сток [98]. К сожалению, в силу различных причин основная часть исследований относится только к достаточно высокопродуктивным лесам, поэтому вопросу о влиянии на возрастную динамику транспирации и испарения лесорастительных условий должного внимания до настоящего времени не уделялось. Вместе с тем, пренебрежение данной зависимостью может привести к серьезным ошибкам при оценке роли леса и хозяйственной деятельности в нем в формировании стока с водосбора. Это возможно, в частности, если возраст, при котором наблюдается максимальная транспирация древостоя, зависит от лесорастительных условий. В этом случае может получиться так, что в одних природных условиях лес конкретной возрастной категории испаряет влаги больше, чем луг, а в других – меньше.

Большая доля суммарного испарения суходольных лесов приходится на тесно связанные с листовым аппаратом транспирацию и испарение задержанных кронами деревьев осадков, поэтому можно утверждать, что возрастная динамика этих элементов водного баланса будет повторять динамику массы листвы. Возрастные же изменения листвы обуславливаются ее функциональным предназначением, включающим поглощение и преобразование энергии, которая затрачивается как на поддержание существующей биомассы, так и на ее прирост [202]. Это объясняет тот факт, что максимальное количество листвы на древостое формируется к такому периоду, когда при достаточно большом объеме фитомассы наблюдается ее интенсивный прирост, что требует больших затрат энергии и вызывает высокий расход растениями влаги. Физиологически обусловленная синхронность возрастной динамики листового аппарата и расхода растительностью воды позволяет судить о влиянии лесорастительных условий на испарение по особенностям формирования различных частей фитомассы. Наличие такой возможности важно, так как практически все составные

части испарения с леса, так же как и его суммарная величина, определяются расчетным путем, поэтому достоверность этих величин и выводов, сделанных на их основании, нуждается хотя бы в косвенных подтверждениях.

Особенности развития сосняков в различных условиях их роста отмечены в [69]. Так, 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. Это объясняет отмеченный авторами данной работы факт, что абсолютная величина массы хвои до 100 лет больше в сосняке черничном, а после 100 лет – в сосняке брусничном. Из этих наблюдений следует, что максимальная масса листвы в высокопродуктивном древостое формируется в более раннем возрасте, чем в низкопродуктивных насаждениях. О задержке роста и развития растущего в суровых условиях древостоя написано в работе [42], где автор утверждает, что интенсивный прирост древесины в северной подзоне тайги наблюдается в насаждениях, возраст которых 80–120 лет.

Расчет возрастной динамики массы листвы для различных типов леса по (1.12) показывает, что в зависимости от лесорастительных условий максимальное количество листьев в хвойных лесах Карелии формируется в возрасте древостоя в среднем от 70 до 120 и более лет (рис. 4.1). Более юный возраст относится к высокопродуктивным лесам II–III классов бонитета (черничные, чернично-кисличные типы леса). В хвойных лесах V, Va классов бонитета возраст максимальных запасов листвы составляет 140–160 лет, в березняках – 50–80 лет.

Особенности возрастной динамики листового аппарата подтверждаются зависимостью возраста максимального текущего прироста от показателя класса бонитета (рис. 4.2). Зависимость была построена для различных типов сосняка с полнотой 1 по данным таблиц хода роста, разработанных Н. И. Казимировым и В. В. Кабановым для Карелии [107]. С ухудшением продуктивности древостоя возраст, при котором отмечается наиболее интенсивный прирост ствольной древесины хвойных пород в лесах Карелии, возрастает от 50–60 лет до 70–80 лет.

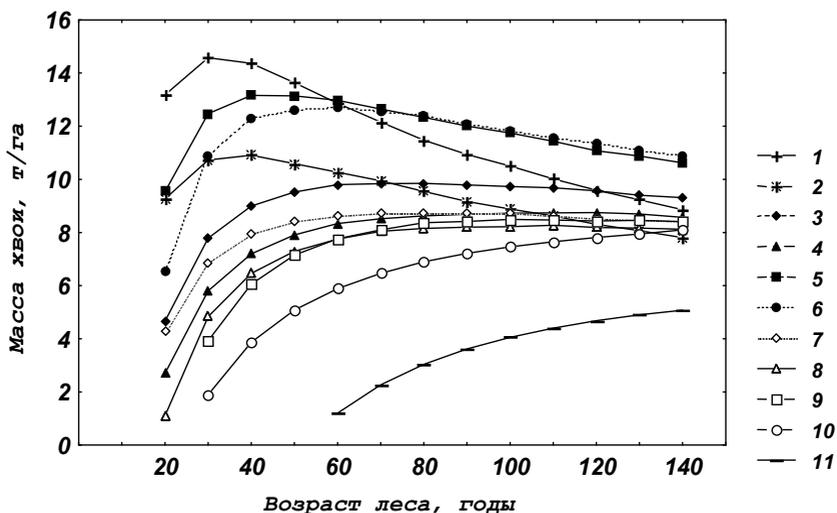


Рис. 4.1. Динамика массы хвой в различных типах сосняков (1 – черничный II класса бонитета, 2 – черничный III класса бонитета, 3 – черничный IV класса бонитета, 4 – черничный V класса бонитета, 5 – брусничный III класса бонитета, 6 – брусничный IV класса бонитета, 7 – брусничный V класса бонитета, 8 – лишайниковый V класса бонитета, 9 – сфагновый V класса бонитета, 10 – сфагновый Va класса бонитета, 11 – сфагновый Vб класса бонитета)

Такие особенности развития древостоя обусловлены тем, что при лучших условиях произрастания, создающих возможности более интенсивного прироста фитомассы, биологически обусловленные для конкретного вида запасы органического вещества накапливаются в более раннем возрасте. Раньше формируются максимальные запасы листвы, служащей для перехвата предельно необходимого и возможного для данных физико-географических условий количества солнечной радиации. Возраст, в котором наблюдаются максимальные запасы листвы, для высокопродуктивного леса определяется физиологическими возможностями растений. В худших условиях роста леса создание необходимого и возможного запаса листвы в силу скудного минерального питания, обуславливающего медленное увеличение биомассы, продолжается еще в приспевающем и спелом древостое.

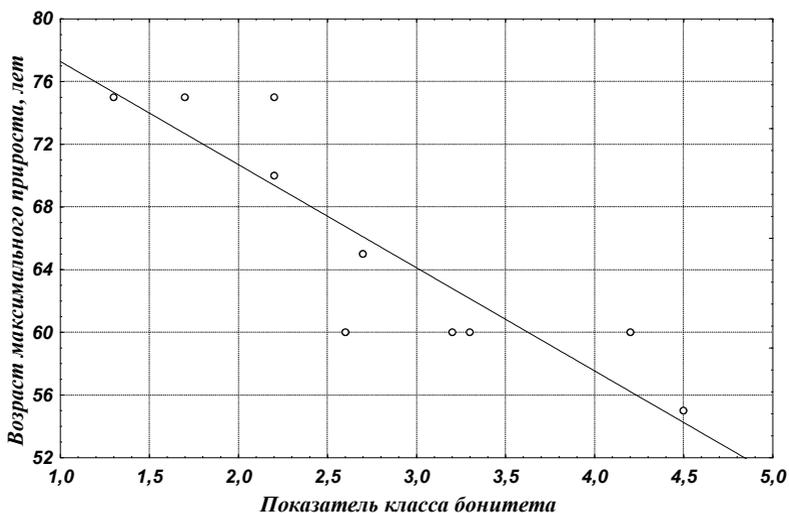


Рис. 4.2. Зависимость возраста максимального прироста древесины сосны от лесорастительных условий

Связь лесорастительных условий с транспирацией показана в таблицах 4.1–4.3. Приведенные в них значения транспирации вычислены с использованием таблиц хода роста различных типов леса [107]. Транспирация рассчитывалась по (3.2), а переменная величина этой формулы – масса листы – по (1.12).

Таблица 4.1

**Транспирация древостоя в различных по продуктивности сосновых лесах, мм**

Тип леса	Класс бонитета	Возраст, лет						Среднее значение
		40	60	80	100	140	160	
Чернично-кисличный	П.5	196	216	213	201	193	191	202
Черничный свежий	П.8	199	226	225	215	209	208	214
Брусничный	III.7	183	223	228	224	220	218	216
Черничный влажный	III.8	176	212	222	222	219	219	212
Долгомошный	IV.3	153	199	217	220	221	220	205
Вересковый	IV.4	160	210	228	229	232	231	215
Лишайниковый	IV.8	130	183	211	222	230	231	201
Багульниковый	IV.8	123	173	202	212	220	221	192
Осоково-сфагновый	V.3	105	153	186	203	210	211	178
Сфагновый	V.7	78	128	163	185	198	198	158

Таблица 4.2

**Транспирация древостоя в различных по продуктивности  
еловых лесах, мм**

Тип леса	Класс бонитета	Возраст, лет						Среднее значение
		40	60	80	100	140	160	
Кисличный	II.8	190	231	229	214	198	193	209
Черничный свежий	III.6	170	222	234	230	217	217	215
Брусничный	IV.1	154	213	231	232	227	227	214
Черничный влажный	IV.3	147	204	230	234	230	230	212
Болотно-травяный	IV.5	137	196	223	231	230	230	208
Долгомошный	V.0	122	178	211	228	233	233	201
Хвощово-сфагновый	V.6	93	148	186	205	223	225	180

Таблица 4.3

**Транспирация древостоя в различных по продуктивности  
березовых лесах, мм**

Тип леса	Класс бонитета	Возраст, лет						Среднее значение
		20	40	50	60	80	100	
Злаково-разнотравный	I.8	205	277	283	278	263	250	259
Разнотравно-черничный	II.7	170	262	277	278	272	263	253
Злаково-брусничный	III.4	137	245	266	273	274	266	245
Болотно-травяный	III.8	129	241	267	279	279	271	244
Осоково-долгомошный	IV.2	102	216	245	259	266	261	225
Осоково-сфагновый	V.0	80	183	213	231	244	240	198

В этих таблицах показано, что при продуктивности от II до III классов бонитета максимальное количество воды хвойный и лиственный древостой расходует в возрасте 50–60 лет. В возрасте, близком к этому, по выводам авторов работы [69], формируется максимальный запас хвои в высокопродуктивном сосняке черничном. В сосняке и ельнике V–Va классов бонитета рост годового значения транспирации продолжается до 140–160, в березняке – до 80–100 лет.

Следует отметить, что наиболее интенсивно, как показывают расчеты, меняется масса листвы и транспирация с возрастом в период до достижения максимальных значений. Снижение этих показателей происходит более плавно, поэтому некоторые расхождения возрастов максимальных значений, в частности, транспирации и прироста (см. рис. 4.2) в менее благоприятных условиях можно

объяснить точностью расчетов сравниваемых показателей. На это косвенно указывают и приведенные ранее выводы Э. П. Галенко [42], утверждающей, что интенсивный прирост на Севере может продолжаться до 120 лет.

Транспирация древостоем и испарение осадков с полога леса непосредственно связаны с массой листвы – увеличение последней ведет к росту этих элементов водного баланса. Испарение с наземного покрова несколько сглаживает данную зависимость, так как между этим элементом и количеством листвы существует обратная связь, поэтому синхронность многолетнего режима суммарного испарения с леса с возрастными изменениями массы листвы древостоя не столь очевидна. С большой долей вероятности ее можно ожидать в высокопродуктивных лесах, где потери влаги на испарение с наземного покрова очень низкие. Нужно отметить, что в Новгородской области в высокопродуктивных лесах авторы работы [200] отмечали соответствие в изменениях с возрастом массы хвои и суммарного испарения с леса.

Косвенным показателем влияния возраста леса на его влагопотребление, а также влияния лесорастительных условий на возрастную динамику суммарного испарения являются зависимости стока и коэффициента стока от доли площади водосбора, занятой лесом конкретной возрастной категории. Анализ выполнен для 30 речных водосборов, расположенных в северной и средней подзонах тайги на территории Карелии. Значения стока и осадков были взяты из наблюдений на сети гидрометеослужбы за три года (1984–1986), к этому же периоду относятся данные лесоустройства о распределении покрытой лесом площади по классам возраста. Анализировались данные по слоям стока и по коэффициентам стока (для исключения влияния пространственных изменений осадков). Коэффициенты корреляции связей приведены в таблицах 4.4 и 4.5.

Более тесные связи получаются, если сгруппировать доли площадей древостоя тех классов возраста, при которых древостой оказывает однонаправленное влияние на сток (табл. 4.5).

Таблица 4.4

**Коэффициенты корреляции связей между слоем и коэффициентом стока с долей площади, занятой лесом различного возраста**

Характеристика	Класс возраста									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Средняя доля площади, %	11	16	9	9	6	4	4	3	3	2
Слой стока, мм	0.25	<u>0.41</u>	0.27	-0.02	0.05	<u>-0.42</u>	-0.24	-0.18	0	0.23
Коэффициент стока	0.21	0.32	0.1	-0.35	-0.13	<u>-0.71</u>	-0.4	-0.32	0.1	0.36

*Примечание.* Подчеркнутые значения коэффициентов корреляции достоверны при уровне значимости 5%.

Таблица 4.5

**Коэффициенты корреляции связей между слоем и коэффициентом стока с долей площади, занятой лесом различных возрастных категорий**

Характеристика	Группы классов возраста			
	I–III	IV–VIII	IX–XIII	I–III, IX–XIII
Средняя доля площади, %	36	26	6	42
Слой стока, мм	<u>0.47</u>	-0.18	0.14	<u>0.46</u>
Коэффициент стока	0.33	<u>-0.51</u>	0.27	<u>0.42</u>

Приведенные в таблицах коэффициенты корреляции свидетельствуют о тенденции положительного влияния на годовой сток молодых лесов I–III классов возраста (до 60 лет хвойных и до 30 лет – лиственных) и перестойных лесов IX–XIII классов возраста (старше 160 лет хвойных и 80 лет – лиственных). Понижение стока в сравнении со среднерайонными значениями отмечается при увеличении площади хвойных и лиственных насаждений IV–VIII классов возраста (70–150 лет для хвойных и 35–75 лет для лиственных насаждений), а наиболее ощутимое влияние оказывает лес VI класса возраста независимо от породного состава (см. табл. 4.4, 4.5).

Так как при одинаковых осадках больший сток формируется в лесах, где испарение меньше и наоборот, то, следовательно, анализ стока свидетельствует, что максимальным водопотреблением в Карелии характеризуется хвойный лес в возрасте 100–120 лет, лиственный – в 50–60 лет.

Нужно отметить, что приведенные результаты свидетельствуют о синхронности возрастной динамики испарения и массы хвои в условиях Карелии. Полученная нами полиномиальная зависимость измеренной массы хвои от возраста древостоя для наиболее распространенных в Карелии типов леса (сосняки черничный и брусничный) по данным, приведенным в [69], имеет следующий вид:

$$m = 6.4 + 0.13 \tau - 0.0006 \tau^2, \quad (4.1)$$

где  $\tau$  – возраст леса, лет.

Используемые для построения уравнения (4.1) измеренные значения массы хвои освещают ее динамику для периода роста сосняков от 15 до 185 лет. Из этого уравнения следует, что максимальный запас хвои наблюдается в сосняке 108-летнего возраста (VI класс возраста). Такое совпадение результатов анализа стока и возрастной динамики массы хвои свидетельствуют о том, что возраст древостоя является важным фактором формирования испарения и стока. Наибольшее влагопотребление, а, следовательно, наименьший сток наблюдается в возрасте, для которого характерно максимальное развитие листового аппарата. В среднем для Карелии самый низкий годовой сток формируется в лесах VI класса возраста. Однако на отдельных небольших водосборах, где произрастают леса, продуктивность которых значительно хуже или лучше, чем соответствующая VI классу возраста, наибольшее отрицательное влияние на сток оказывают более старые или наоборот – молодые леса.

По данным А. А. Молчанова [128] и О. И. Крестовского [98], максимальное значение эвапотранспирации (минимальное значение стока) наблюдается во II и III классах возраста (30–50 лет для хвойных пород). Расхождение между результатами исследований данных авторов и приведенными выше обусловлены, по-видимому, тем, что наши расчеты относятся к сравнительно низкопродуктивным лесам (средний класс бонитета хвойных насаждений в Карелии – IV.4 [91]), а исследования А. А. Молчанова и О. И. Крестовского проводились в более южных регионах, характеризующихся лучшими лесорастительными условиями. Поскольку в низкопродуктивных лесах максимальные запасы листвы создаются позже, чем в высокопродуктивных, то данное расхождение не противоречит нашим выводам о зависимости динамики испарения от лесорастительных условий.

#### 4.1.2. Связь условий произрастания, продуктивности и породного состава леса с транспирацией и суммарным испарением

Из полученных ранее зависимостей (3.7) и (3.8) следует, что удельный расход влаги (на единицу биомассы) как на прирост, так и на жизнеобеспечение существующей биомассы увеличивается со снижением продуктивности леса. Для более наглядной оценки расходования влаги растениями в различных условиях их роста напишем отношение, характеризующее влияние продуктивности и условий произрастания на транспирацию:

$$Et_{\tau i} / Et_{\tau i-1} = (\mu_i M_{\tau i} + \rho_i \Delta M_{\tau i}) / (\mu_{i-1} M_{\tau i-1} + \rho_{i-1} \Delta M_{\tau i-1}), \quad (4.2)$$

где  $Et_{\tau i}$  и  $Et_{\tau i-1}$  – транспирация древостоем возраста  $\tau$  и  $i-1$  классов бонитета соответственно;  $\mu_i$  и  $\mu_{i-1}$  – коэффициенты, характеризующие удельное потребление влаги для поддержания жизнедеятельности древостоя  $i$  и  $i-1$  классов бонитета соответственно;  $M_{\tau i}$  и  $M_{\tau i-1}$  – запасы стволовой древесины в возрасте  $\tau$  в лесах  $i$  и  $i-1$  классов бонитета соответственно;  $\rho_i$  и  $\rho_{i-1}$  – коэффициенты, характеризующие потребление влаги на прирост древостоя  $i$  и  $i-1$  классов бонитета соответственно;  $\Delta M_{\tau i}$  и  $\Delta M_{\tau i-1}$  – текущий прирост запаса стволовой древесины в лесах возраста  $\tau$  и  $i$  и  $i-1$  классов бонитета соответственно.

Уравнение (4.2) представляет собой отношение транспирации одновозрастным, но различающимся по продуктивности древостоем. Индексом  $i$  отмечены транспирация древостоем и факторы, ее определяющие, в худших условиях произрастания. Улучшение среды на 1 класс бонитета показано индексом  $i-1$ .

После замены  $\mu$  и  $\rho$  в соответствии с формулами (3.7) и (3.8) и простых преобразований получаем:

$$\frac{Et_{\tau i}}{Et_{\tau i-1}} = \exp(b) (M_{\tau i} + c \exp(d Kl_i)) \Delta M_{\tau i} / (M_{\tau i-1} + c \exp(d Kl_{i-1})) \Delta M_{\tau i-1}. \quad (4.3)$$

При повышении продуктивности леса одного и того же возраста увеличиваются запас древостоя и интенсивность его прироста, но снижаются потребление влаги на прирост и жизнеобеспечение единицы фитомассы. Интенсивность как положительных, так и отрицательных изменений этих факторов зависит от породы, класса бонитета и возраста, поэтому в отдельных возрастных категориях

можно наблюдать снижение транспирации при росте продуктивности, хотя генеральная ее тенденция положительная (см. табл. 4.1 и 4.2).

Наибольшее влияние условий роста леса на транспирацию древостоем отмечается в молодом возрасте. При этом максимальные за период роста леса величины транспирации меняются не столь значительно. Слабое влияние условий роста на максимальные значения транспирации объясняются, по-видимому, тем, что при одинаковой полноте, равной 1, количество поглощаемой энергии меньше зависит от условий произрастания древостоя, так как в любых лесорастительных условиях жизнедеятельность растительного покрова направлена на создание возможности для наиболее полной утилизации солнечной энергии листовым аппаратом. Более низкая транспирация молодого древостоя в худших условиях роста объясняется его отставанием в росте и развитии на менее плодородных землях.

Выше было показано, что удельное расходование влаги древостоем как на рост, так и на обеспечение жизнедеятельности зависит от продуктивности почвогрунтов. Со снижением продуктивности почв удельный расход влаги древостоем возрастает. Это с полным основанием можно отнести к насаждениям, растущим на суходольных местах. Поэтому для такого древостоя, основываясь на формулах (3.4), (3.6) и (3.6'), удельную транспирацию можно выразить следующим образом:

$$E_{il} = P_{il}/C_i = \beta/L, \quad (4.4)$$

где  $E_{il}$  – расход воды на прирост единицы фитомассы и на обеспечение ее жизнедеятельности;  $P_{il}$  – необходимое количество  $i$ -го минерального элемента, необходимого для прироста и жизнедеятельности единицы фитомассы;  $C_i$  – концентрация лимитирующего жизнедеятельность древостоя в конкретных природных условиях  $i$ -го минерального элемента;  $\beta$  – количество солнечной радиации, необходимое для транспирации  $E_{il}$ ;  $L$  – удельная теплота испарения.

Полное количество поглощенной древостоем на единице площади солнечной радиации, сумму транспирации древостоем и поступившего с почвенным раствором в древостой  $i$ -го минерального элемента с единицы площади можно получить, умножив удельные величины уравнения (4.4) на все количество фитомассы ( $\Sigma M$ ):

$$\Sigma M E_{il} = E_i = \Sigma M \beta/L = B_i/L = P_{il} \Sigma M /C_i. \quad (4.5)$$

Необходимое для прироста и жизнеобеспечения единицы фитомассы количество  $i$ -го минерального элемента ( $P_{ii}$ ) не должно зависеть от условий произрастания. Но его концентрация ( $C_i$ ) в почвенном растворе уменьшается с ухудшением условий роста леса. В соответствии с этим, как свидетельствуют таблицы хода роста древостоя (например, представленные в [107]), уменьшается запас фитомассы ( $\Sigma M$ ). При уменьшении знаменателя и числителя правой части (4.5) существенных изменений самой дроби, а, следовательно, и  $E_t$  ожидать не приходится. Кроме того, уменьшение общей фитомассы с ухудшением условий роста леса сопровождается увеличением доли в ней ассимилирующего аппарата [71, 72], что позволяет поддерживать количество поглощенной солнечной радиации ( $B_t$ ) на достаточно высоком уровне, следовательно, также является стабилизирующим фактором для величины  $E_t$  при изменении классов бонитета. Такой вывод можно считать относительно справедливым для спелого древостоя, полнота которого равна 1. Для молодого древостоя задержка в росте, в том числе и листового аппарата, в плохих условиях отрицательно отражается на транспирации (см. таблицы 4.1–4.3). Очевидно, что уменьшение полноты древостоя в большей степени приводит к снижению транспирации, так как при этом снижается площадь испаряющей поверхности.

На суммарном испарении с леса лесорастительные условия отражаются в меньшей степени, чем на транспирации, так как с уменьшением фитомассы древостоя большая часть солнечной энергии достигает наземного покрова и утилизируется там, расходуясь и на испарение. Однако как показывают расчеты, снижение суммарного испарения с ухудшением условий роста леса имеет место. Это связано, по-видимому, еще и с тем, что с уменьшением листового аппарата происходит изменение структуры теплового баланса, при этом возрастает доля теплообмена с почвой и всеми элементами растительного покрова. Еще в большей степени такое преобразование теплового баланса можно ожидать при уменьшении полноты древостоя, поэтому в этом случае снижение суммарного испарения будет более значительным. Это особенно важно иметь в виду, так как полнота реального леса меняется в значительных пределах.

Зависимости транспирации и суммарного испарения от возраста и лесорастительных условий для реальных лесов на примере сосняков, произрастающих в северной и средней таежных подзонах ЕСР, приведены в табл. 4.6. Для этих расчетов использовались осредненные для различных условий произрастания таксационные характеристики древостоя. Высота и запас древостоя рассчитывались по (1.8) и (1.8') с использованием табл. 1.10, масса листвы вычислялась по (1.12), листовой индекс – по (1.13). Суммарное испарение определялось по методу Крестовского.

Таблица 4.6

**Суммарное испарение ( $E$ ), транспирация ( $E_t$ ) и доля транспирации ( $E_t\%$ ) в зависимости от возраста в некоторых типах сосновых лесов среднетаежной подзоны**

Тип леса	Класс бонитета	Характеристика	Возраст леса					
			20	40	60	80	100	120
Брусничный	III	$E$	423	471	468	459	451	442
		$E_t$	181	250	247	235	223	210
		$E_t\%$	43	53	53	51	49	48
	V	$E$	381	407	413	414	414	412
		$E_t$	81	151	164	166	165	162
		$E_t\%$	21	37	40	40	40	39
Черничный	II	$E$	471	490	467	447	435	424
		$E_t$	250	273	244	218	200	182
		$E_t\%$	53	56	52	49	46	43
	IV	$E$	383	417	426	427	425	424
		$E_t$	89	171	186	187	185	182
		$E_t\%$	23	41	44	44	44	43
Сфагновый	V	$E$		391	405	411	412	412
		$E_t$		115	148	159	161	160
		$E_t\%$		29	37	39	39	39
	Va	$E$		380	390	398	402	406
		$E_t$		74	112	131	142	148
		$E_t\%$		19	29	33	35	36

Из табл. 4.6 следует, что суммарное испарение повторяет динамику транспирации, и эти элементы водного баланса уменьшаются с ухудшением лесорастительных условий и продуктивности древостоя. Кроме того, продуктивность лесов отражается на структуре их суммарного испарения. Ухудшение условий роста

сопровождается снижением как минимальных за период роста леса, так и максимальных значений транспирации. Причем в реальных условиях снижение максимальной транспирации с ухудшением продуктивности леса усугубляется еще часто уменьшением полноты древостоя. Этот фактор в значительной степени и объясняет изменение структуры суммарного испарения – снижение доли транспирации.

Наиболее рациональное потребление влаги отмечается в высокопродуктивных лесах (черничные II класса бонитета и брусничные III класса бонитета), где доля транспирации, особенно в возрасте, который характеризуется самым высоким приростом древостоя, превышает 50%. В то же время в сфагновых лесах роль транспирации в формировании суммарного испарения снижается до 20–30%. Вариация суммарного испарения как при изменении лесорастительных условий, так и в ходе роста леса происходит в меньших пределах, чем транспирации, что обусловлено компенсирующим влиянием испарения с наземного покрова.

В работе [92] также показано повышение коэффициента полезного действия испарения (снижение удельной величины суммарного испарения на прирост стволовой древесины) с улучшением лесорастительных условий. В главе 3 дано обоснование этого процесса. Однако расчеты транспирации и суммарного испарения показывают, что увеличение биомассы, соответствующее повышению продуктивности биогеоценоза, приводит к большему суммарному расходу влаги в высокопродуктивных лесах по сравнению с низкопродуктивными.

Исследование влияния продуктивности древостоя на водный баланс леса основывается на теоретических рассуждениях и моделировании испарения в различных лесорастительных условиях. Для повышения объективности полученного вывода о снижении испарения с ухудшением условий роста леса был выполнен анализ, основанный на измеренных данных о стоке. Анализ проводился для 31 водосбора Карелии. По этим водосборам имеются данные по стоку и материалы таксации лесного фонда. Испарение с водосборов было рассчитано по уравнению водного баланса. Площадь водосборов изменяется от 1.46 до 388 км<sup>2</sup>, средняя лесистость

составляет 73% и колеблется по водосборам от 46 до 94%. Для каждого водосбора был рассчитан средний по каждой из пород и по всем породам класс бонитета. При анализе вместо класса бонитета использовался показатель класса бонитета (глава 3). На основании этих данных было получено, что увеличение суммарного испарения при повышении продуктивности леса на 1 класс бонитета составляет в зависимости от породы 44–70 мм. Зависимость суммарного испарения от осредненного по всем породам показателя бонитета приведена на рис. 4.3.

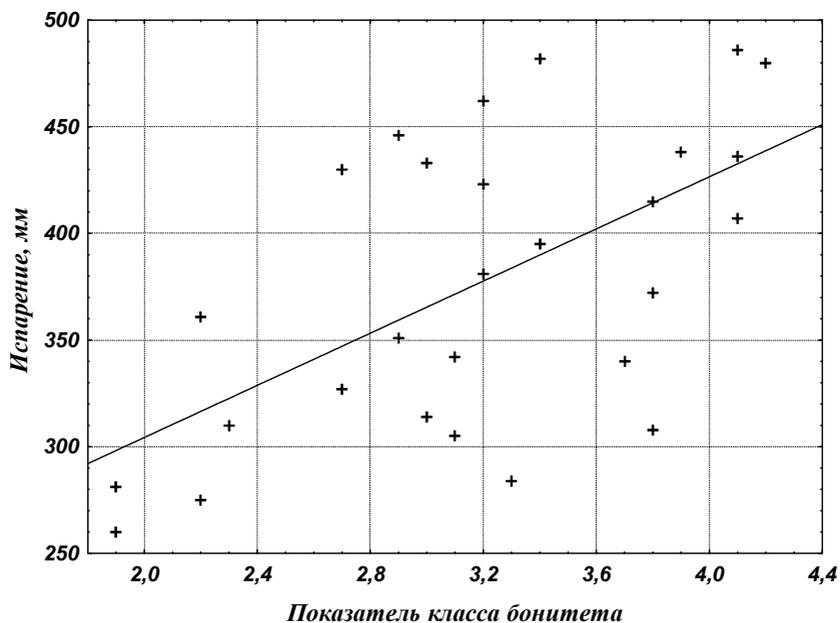


Рис. 4.3. Зависимость суммарного испарения с лесного водосбора от продуктивности леса

Более детальные исследования с учетом возрастной динамики зависимости эвапотранспирации леса от его продуктивности выполнялись с использованием метода Крестовского (глава 3) и информации о таксационных характеристиках разных типов леса южной подзоны тайги, любезно предоставленной нам А. А. Кнize и О. И. Крестовским. Эти таксационные характеристики являются

осредненными значениями большого количества данных по каждому бонитету и типу леса Ленинградской области (южная подзона тайги), полученных на пробных площадях. По ним за 140-летний период роста леса с временным шагом в 10 лет было рассчитано суммарное испарение для 10 типов сосняков, 10 – ельников и 10 – березняков по приведенным в главе 3 формулам (рис. 4.4–4.6). Полученные величины эвапотранспирации были усреднены по породам для каждого класса бонитета за 140 лет, и эти усредненные значения использовались для построения зависимости эвапотранспирации от класса бонитета (рис. 4.7). Такие же связи были получены для наибольшего за период развития леса суммарного испарения, которое наблюдается в зависимости от типа леса в возрасте 40–100 лет.

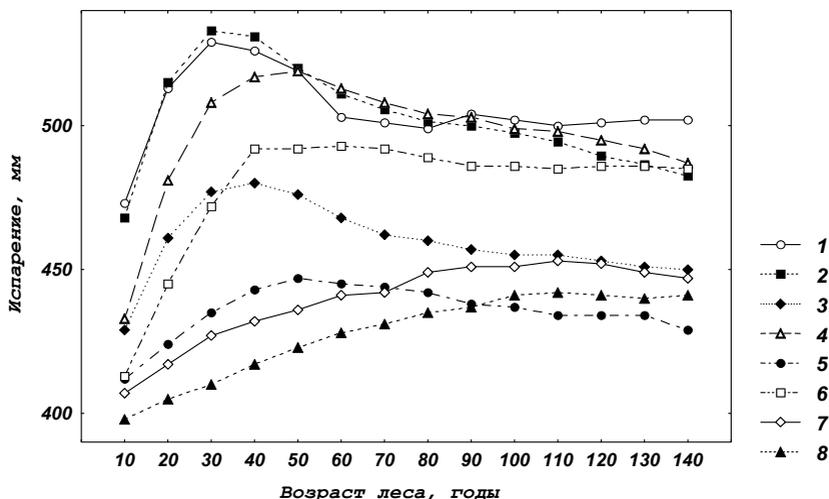


Рис. 4.4. Среднее многолетнее годовое испарение с сосняков южной подзоны тайги (1 – кисличный I кл. бонитета, 2 – черничный II кл. бонитета, 3 – брусничный III кл. бонитета, 4 – долгомощный III кл. бонитета, 5 – лишайниковый IV кл. бонитета, 6 – сфагново-черничный IV кл. бонитета, 7 – багульниковый V кл. бонитета, 8 – сфагновый Va кл. бонитета)

Нужно отметить, что данные зависимости несколько отличаются от линейных (см. рис. 4.7). Наибольшие приращения эвапотранспирации с изменением бонитета отмечаются в диапазоне

от II до V класса бонитета, а в наиболее продуктивных лесах и в самых неблагоприятных условиях произрастания интенсивность изменения приращения эвапотранспирации снижается. Однако для большей части произрастающих в исследуемом регионе лесов эти связи с достаточной точностью аппроксимируются линейными уравнениями. Такие уравнения были получены для средних и максимальных величин эвапотранспирации для сосны, ели и березы. Коэффициенты корреляции уравнений изменяются от 0.70 до 0.90. Наиболее тесные связи получены для сосняков. Это объясняется тем, что сосновые леса более однородны по составу во всех возрастных группах и условиях произрастания. В составе ельников в значительной степени представлены лиственные породы, доля которых зависит от возраста и класса бонитета леса. Уровень значимости коэффициентов регрессии равен 1%. Несмотря на короткие ряды, полученные уравнения характеризуют реальное влияние условий роста леса на испарение, так как каждая переменная есть средняя из большого числа данных.

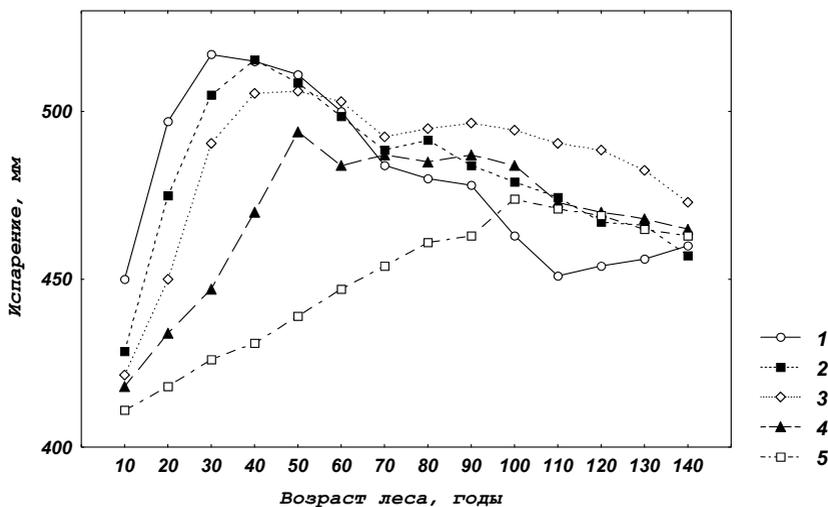


Рис. 4.5. Среднее многолетнее годовое испарение с ельников южной подзоны тайги (1 – кисличный I кл. бонитета, 2 – черничный II кл. бонитета, 3 – черничный III кл. бонитета, 4 – сфагново-черничный IV кл. бонитета, 5 – травяно-сфагновый V кл. бонитета)

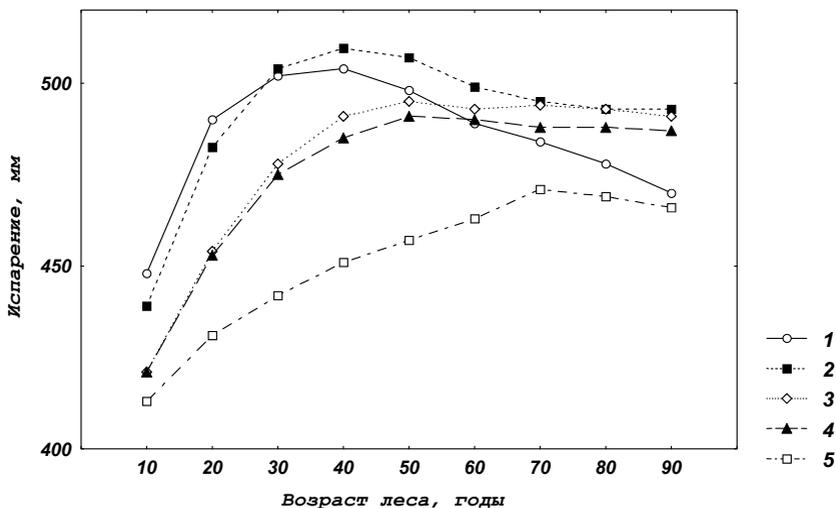


Рис. 4.6. Среднее многолетнее годовое испарение с березняков южной подзоны тайги (1 – кисличный I кл. бонитета, 2 – черничный II кл. бонитета, 3 – черничный III кл. бонитета, 4 – долгомошно-черничный III кл. бонитета, 5 – травяно-сфагновый IV кл. бонитета)

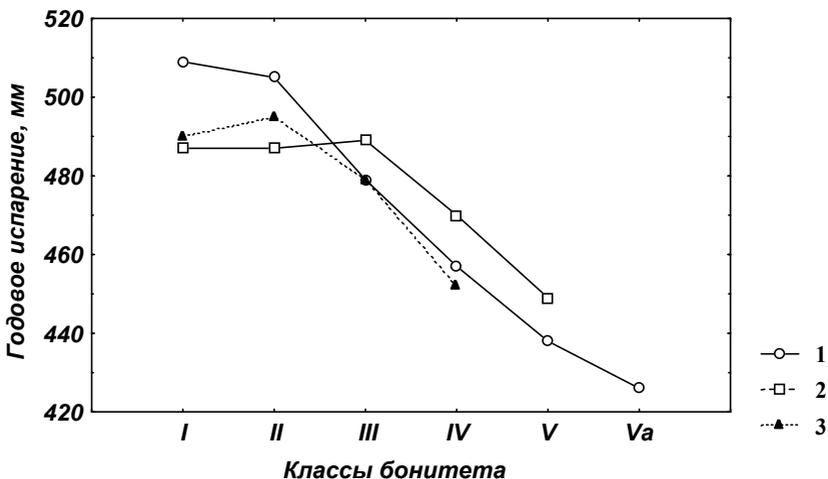


Рис. 4.7. Зависимость испарения от классов бонитета для различных пород древостоя (1 – сосна, 2 – ель, 3 – береза)

В соответствии с полученными уравнениями улучшение условий роста древостоя на I класс бонитета сопровождается увеличением максимального за период развития леса суммарного испарения: с сосняков на 22 мм, с ельников на 11 мм и с березняков на 14 мм. Для усредненной за 140 лет роста леса эвапотранспирации эти величины составляют соответственно 18, 7 и 11 мм.

Полученная «цена» класса бонитета отвечает условиям, при которых леса каждого бонитета равномерно распределены по возрастным категориям. Однако в действительности в производных лесах ЕСР это не всегда выполняется. Высокопродуктивные леса эксплуатируются более интенсивно, чем низкопродуктивные, заболоченные, поэтому средний возраст древостоя увеличивается от I класса бонитета к V классу. В этом случае, основываясь на зависимости эвапотранспирации от возраста, можно ожидать более высокого приращения суммарного испарения при улучшении лесорастительных условий на I класс. Это и подтверждается приведенными выше для карельских лесов, хотя, возможно, несколько завышенными, значениями  $\Delta E/\Delta B$ .

Следует отметить, что гидрологическая роль породного состава лесов, покрывающих водосборы, освещена в литературе в работах А. А. Молчанова [128], Ю. Л. Раунера [158], С. Ф. Федорова и др. [200]. Однако эти исследования относятся к более южным районам, где на соотношение суммарного испарения может влиять увлажненность периода исследований и места произрастания той или иной породы. Кроме того, исследования проводились только в высокопродуктивных лесах, поэтому выводы, полученные данными авторами, могут оказаться несправедливыми для северных районов, где преобладают низкопродуктивные насаждения.

Для исключения влияния на испарение всех, кроме породного состава, факторов по уравнениям (1.1)–(1.3) для каждого бонитета сосняков, ельников и березняков была рассчитана возрастная динамика средней высоты древостоя. По полученным данным рассчитывался запас стволовой древесины для полноты, равной 1, по уравнениям (1.7<sup>1</sup>)–(1.7<sup>3</sup>). Эти характеристики использовались для расчета массы листвы и листового индекса, определяющих значе-

ния транспирации и остальных членов суммарного испарения. Полученные осредненные за период роста (10–120 лет) значения транспирации и суммарного испарения различного по продуктивности и по породному составу древостоя полнотой, равной 1, приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

**Средние значения испарения и транспирации сосняков, ельников и березняков при полноте, равной 1, за период роста от 10 до 120 лет**

Характеристика	Класс бонитета						
	Ia	I	II	III	IV	V	Va
Сосняк							
Транспирация	188	197	199	196	182	160	149
Испарение	429	437	438	438	437	426	413
Ельник							
Транспирация	198	207	210	208	195	172	163
Испарение	420	430	435	438	432	422	400
Березняк							
Транспирация	258	270	273	270	254	219	178
Испарение	431	439	442	443	437	429	407

При уменьшении полноты древостоя абсолютные величины транспирации и испарения снижаются, но соотношения этих значений для различных пород сохраняются (табл. 4.8).

Таблица 4.8

**Средние значения испарения и транспирации сосняков, ельников и березняков при полноте, равной 0.6, за период роста от 10 до 120 лет**

Характеристика	Сосняк		Ельник		Березняк	
	III	V	III	V	III	V
Транспирация	118	96	125	103	162	132
Испарение	394	390	367	363	383	378

Возрастная динамика транспирации и суммарного испарения рассматриваемых пород в различных лесорастительных условиях показана на рисунках 4.8–4.13.

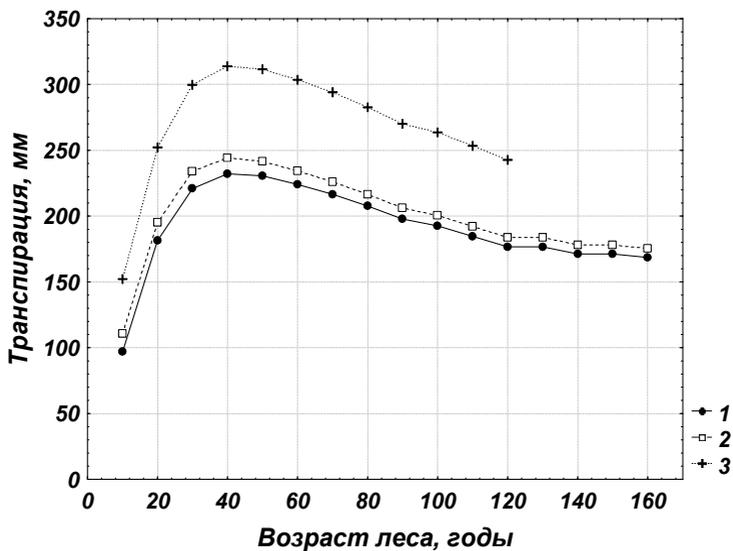


Рис. 4.8. Транспирация сосняка (1), ельника (2) и березняка (3) I класса бонитета

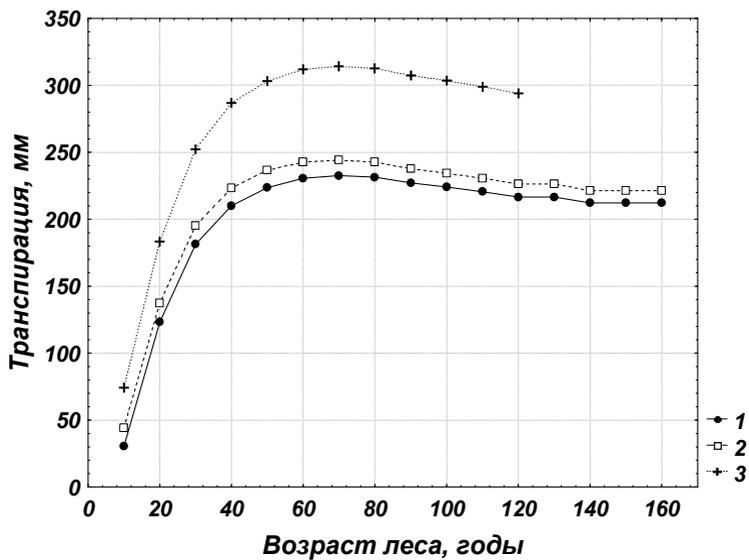


Рис. 4.9. Транспирация сосняка (1), ельника (2) и березняка (3) III класса бонитета

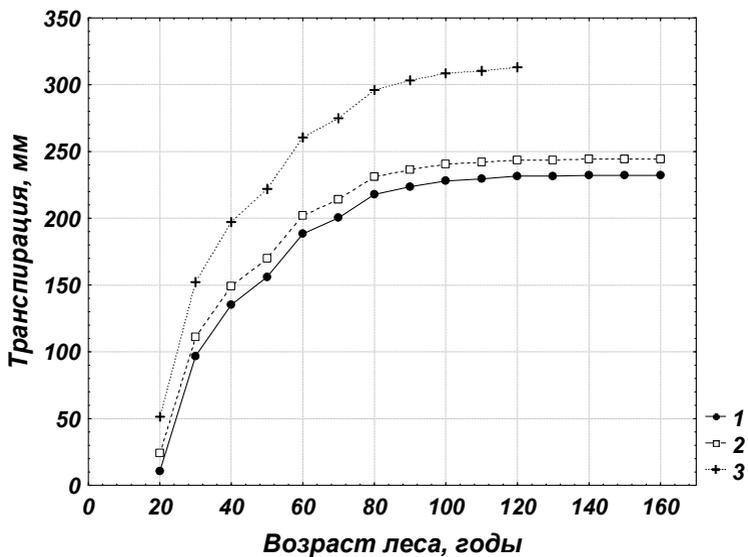


Рис. 4.10. Транспирация сосняка (1), ельника (2) и березняка (3) V класса бонитета

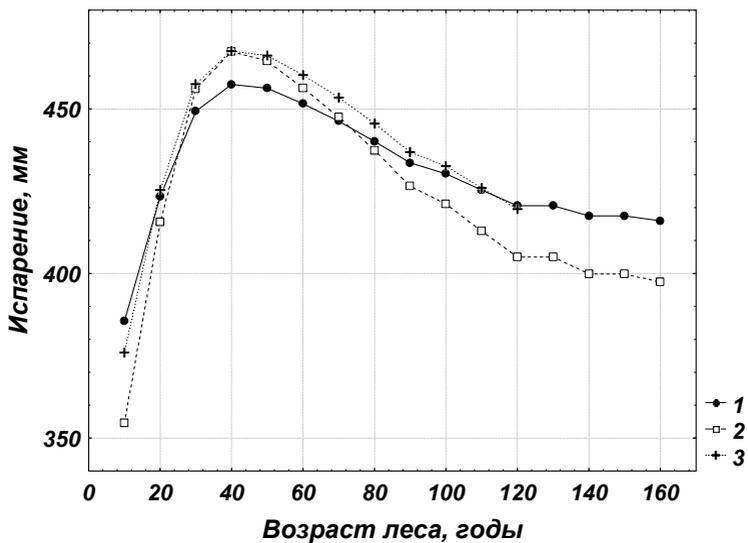


Рис. 4.11. Суммарное испарение с сосняка (1), ельника (2) и березняка (3) I класса бонитета

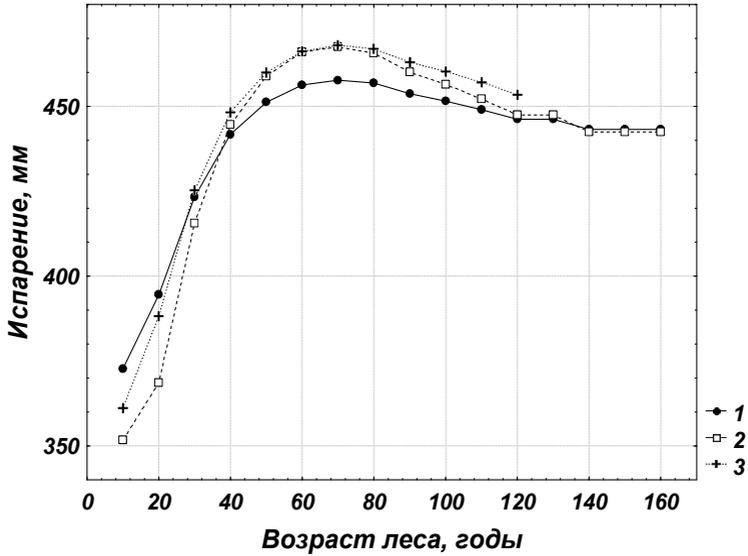


Рис. 4.12. Суммарное испарение с сосняка (1), ельника (2) и березняка (3) III класса бонитета

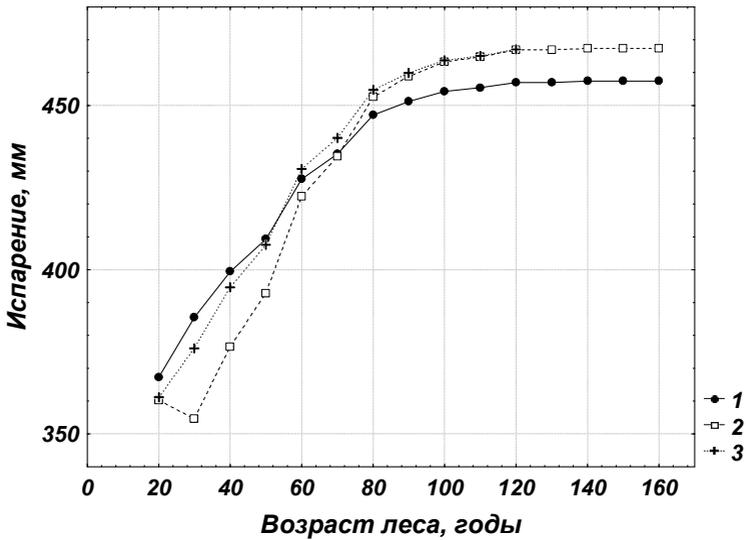


Рис. 4.13. Суммарное испарение с сосняка (1), ельника (2) и березняка (3) V класса бонитета

Результаты моделирования свидетельствуют, что суммарное испарение с произрастающих в одинаковых условиях насаждений практически не зависит от их породного состава. Данные, приведенные в табл. 4.7, не противоречат выводам Ю. Л. Раунера [158], С. Ф. Федорова, С. В. Марунича и А. С. Федорова [200]. По данным А. А. Молчанова [128], наибольшее количество влаги испаряют еловые леса, немного им уступают березовые и последнее место в этом ряду занимают сосновые (473, 456 и 428 мм/год).

Вместе с тем, вследствие невысокой точности доступных методов и при этом небольшого количества исследований, проводимых в различных лесорастительных условиях, сложно делать категоричные выводы о влиянии породного состава древостоя на суммарное испарение с леса. Однако даже учитывая расхождения в испарении с березняков, ельников и сосняков в работе А. А. Молчанова, можно заключить, что породный состав не играет существенной роли в пространственной вариации суммарного испарения.

В то же время можно достаточно уверенно отметить, что транспирация березняка на 35–40% выше, чем хвойных пород. Этот вывод подтверждается полученными выше результатами об удельном расходе влаги на прирост и на жизнеобеспечение. Высокая интенсивность обменных процессов березы обеспечивает более быстрый ее рост.

Особенностью в динамике транспирации и суммарного испарения всех трех пород является увеличение возраста, характеризуемого максимальным расходом влаги за период роста древостоя, с ухудшением лесорастительных условий (см. рис. 4.8–4.13). Этим объясняется и небольшой рост средних значений транспирации и испарения до II–III классов бонитета (см. табл. 4.7). Такое положение отмечалось и обосновывалось выше для естественных насаждений.

#### 4.1.3. Влияние климатических факторов на суммарное испарение с леса

Влияние климатических условий на испарение с леса проявляется через изменение физических и биологических факторов. К основным биологическим факторам относятся породный состав и продуктивность древостоя, а к основным физическим – солнечная радиация, температура воздуха и осадки. Изменения как физиче-

ских, так и биологических факторов носят в основном зональный характер. Вместе с тем долгопериодные изменения климатических характеристик в пределах одной климатической зоны могут привести к преобразованию продуктивности древостоя и, следовательно, к изменению испарения с леса.

Оценка изменения испарения с использованием полученных расчетных данных о преобразовании класса бонитета (см. табл. 1.14) была выполнена двумя способами.

В основу первого способа положен приведенный выше бонитетный градиент испарения. Изменение испарения оценивалось по уравнению [86, 231]:

$$\Delta E = k_k \Delta K_B + \Delta E'(E_0), \quad (4.6)$$

где  $k_k$  – коэффициент, характеризующий изменение испарения на каждый класс бонитета, равный для максимального испарения в сосняках, ельниках и березняках, соответственно 22, 11 и 14 мм, для усредненного испарения – 18, 7 и 11 мм (см. рис. 4.7);  $\Delta E'(E_0)$  – изменение испарения с наземного покрова за счет изменения испаряемости.

Необходимость введения слагаемого  $\Delta E'(E_0)$  обосновывается следующими рассуждениями. Значения эвапотранспирации, которые использовались при определении  $k_k$ , были получены в одинаковых климатических условиях. Изменения классов бонитета в этом случае определяются только местом произрастания (почвенными и гидрогеологическими условиями). Поэтому при таком подходе не учитывать этот член можно только при оценках изменения транспирации древостоем и испарения задержанных пологом леса осадков. В расчетах этих составных частей суммарного испарения не используется температура воздуха. Влияние этого климатического фактора опосредованно учитывается через изменение массы ассимилирующего аппарата. В вычислениях испарения с наземного покрова по формуле (3.73) при прогнозируемых климатических условиях следует учитывать изменение испаряемости с изменением температуры воздуха. Для условий таежной зоны ЕСР температурный градиент испаряемости был получен по связи  $E_0 = f(T_m)$  и принимался равным 16 мм/град. Это значение для исследуемого района соответствует полученному теоретическим путем М. И. Бурдыко [23].

Испарение с наземного покрова зависит от типа и возраста леса, однако его изменение с изменением климатических условий можно принять независимым от условий произрастания для насаждений одинаковой полноты и породы. Поэтому в качестве второго слагаемого в (4.6) ( $\Delta E'(E_0)$ ) принимались усредненные за период роста леса значения. Для сосняков эти значения составляют в среднем  $-5$ ,  $5$  и  $10$ , для ельников  $-3$ ,  $3$  и  $5$  мм и для березняков  $-5$ ,  $5$  и  $9$  мм при изменении температуры соответственно на  $-1$ ,  $1$  и  $2$  °С.

Полученные оценки влияния возможных изменений температуры воздуха на суммарное испарение лесов Мурманской области и Карелии приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

**Изменение средних (числитель) и максимальных (знаменатель) за период роста древостоя значений испарения с леса при возможных изменениях температуры воздуха**

$\Delta T$ , °С	Мурманская область			Республика Карелия					
	северная подзона тайги						средняя подзона тайги		
	сосна	ель	береза	сосна	ель	береза	сосна	ель	береза
-1	-16/-18	-8/-11	-10/12	-12/-14	-6/-8	-9/-11	-10/12	-6/-7	-8/-9
1	14/16	7/10	9/11	12/14	6/7	8/9	10/12	6/7	8/9
2	26/30	12/16	18/20	23/25	11/14	16/17	21/23	9/12	14/16

Процесс расчета изменения испарения с изменением температуры воздуха по второму способу можно представить в виде двух блоков. Первый блок включает в себя определение изменения таксационных характеристик (высоты древостоя, запаса стволовой древесины, массы листвы и листового индекса) с учетом приведенных в табл. 1.14 приращений бонитетов. Средняя высота древостоя и запас стволовой древесины вычисляются по полученным уравнениям (1.8) и (1.8') с учетом коэффициентов, указанных в табл. 1.10. Изменение средней высоты древостоя с изменением класса бонитета определяется по (1.1'), а соответствующие приращения запаса стволовой древесины – с использованием уравнений (1.7<sup>1</sup>)–(1.7<sup>3</sup>). Наличие данных характеристик позволяет получить массу листвы и листовой индекс по (1.12) и (1.13). Второй блок составляют формулы для определения составных частей суммарного испарения по методу Крестовского, представленного в главе 3.

Применение данного способа позволяет оценить преобразование динамики испарения при изменении температуры воздуха в различных типах леса. Наибольшие изменения средних за период роста древостоя величин испарения при повышении или снижении температуры воздуха отмечаются в лесах, произрастающих в худших условиях. К таким относятся леса, характеризуемые V, Va, Vб классами бонитета, в частности, сфагновые сосняки (рис. 4.14). Следовательно, в таких лесах в наибольшей степени проявляется зависимость процессов обмена от температуры воздуха. Процесс роста деревьев в этих условиях, об интенсивности которого можно судить по реакции класса бонитета на изменение температуры воздуха (см. табл. 1.14), в меньшей степени связан с данным метеорологическим элементом, чем для высокопродуктивных лесов. Небольшое увеличение прироста и значительное возрастание испарения объясняется тем, что низкопродуктивному древостою для осуществления роста требуется большее количество удельной энергии (большой удельный расход воды (см. табл. 3.1), определяющей интенсивность обмена, показателем которого может служить транспирация.

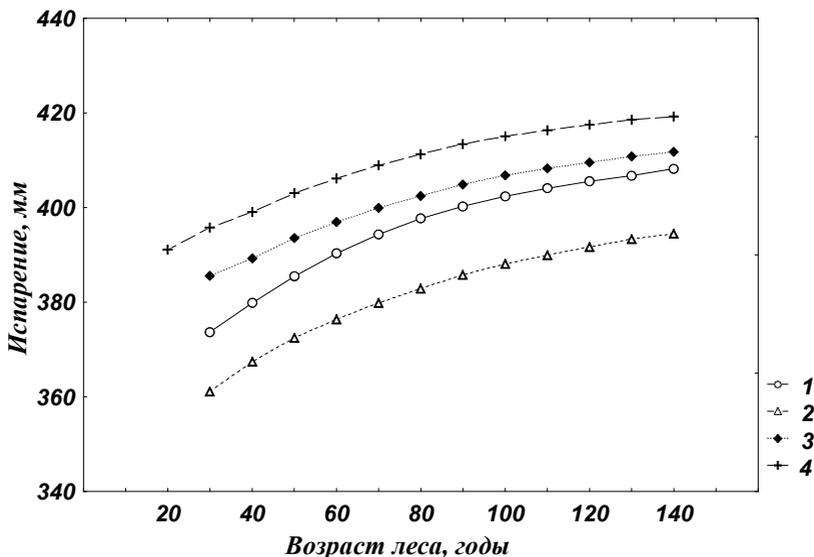


Рис. 4.14. Испарение с сосняка сфагнового (Va класс бонитета) при среднегодовой температуре воздуха 2,4 °C (1), 1,4 °C (2), 3,4 °C (3), 4,4 °C (4)

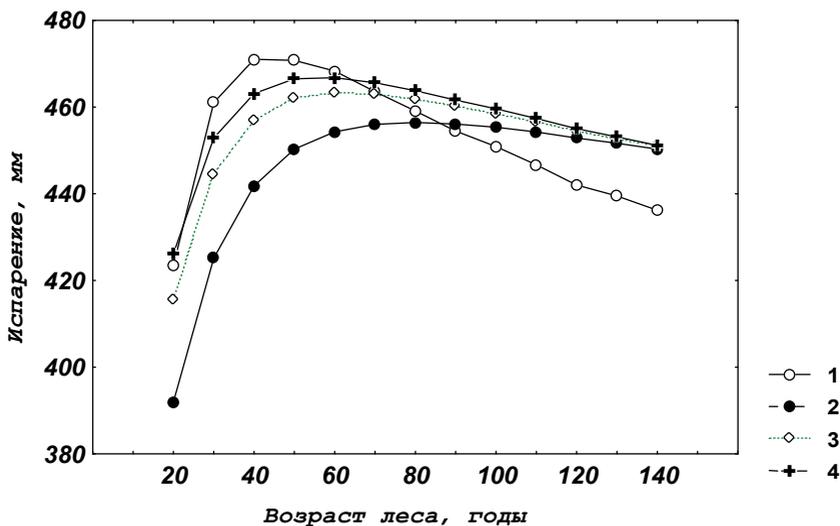


Рис. 4.15. Испарение с сосняка брусничного (III класс бонитета) при среднегодовой температуре воздуха 2.4 °C (1), 1.4 °C (2), 3.4 °C (3), 4.4 °C (4)

Менее значимые изменения происходят в высокопродуктивных лесах I, II и III классов бонитета (см. рис. 4.15). Интенсивность различных процессов и их соотношения в таких лесах наиболее близки к оптимальным для растений данных видов.

Величина изменения испарения, особенно в высокопродуктивных лесах, зависит от возраста деревьев, и в отдельных случаях знак, при прочих равных условиях, меняется на противоположный (см. рис. 4.15).

Наличие высокопродуктивных лесов на территории ЕСР ограничено суровостью природных условий, но в направлении с севера на юг их доля в лесном фонде возрастает. Высокая продуктивность характерна для лесов, относящихся к зеленомошной группе типов (черничных, брусничных и кисличных) различного породного состава. Динамика суммарного испарения при различных температурных условиях в среднетаежной подзоне Карелии для произрастающих здесь лесов представлена в табл. 4.10.

Таблица 4.10

**Динамика суммарного испарения в среднетаежных сосновых лесах Карелии при изменении среднегодовой температуры воздуха ( $\Delta T$ ), °С**

Возраст	Сосняк черничный, IV кл. бонитета				Сосняк брусничный, IV кл. бонитета			
	$\Delta T = -1$	$\Delta T = 0$	$\Delta T = 1$	$\Delta T = 2$	$\Delta T = -1$	$\Delta T = 0$	$\Delta T = 1$	$\Delta T = 2$
20	372	383	397	407	367	395	393	404
30	390	405	413	422	399	439	424	435
40	401	417	422	430	423	458	444	453
50	409	423	427	434	437	463	455	462
60	414	426	430	436	445	464	460	465
70	417	427	431	437	451	462	462	467
80	419	427	432	437	454	460	463	467
90	421	426	432	436	455	456	463	466
100	422	425	432	436	456	452	463	465
110	422	425	432	435	456	449	462	463
120	423	424	431	435	456	446	460	462
130	423	422	431	434	456	442	459	460
140	423	421	430	433	455	439	458	458
Среднее	412	419	426	432	439	448	451	456

Изменения усредненных за период роста древостоя значений испарения для различных по типам и продуктивности лесов Карелии и Мурманской области представлены в табл. 4.11. Изменения даны только для случаев роста среднегодовых температур. При отрицательных значениях  $\Delta T$  полученные величины изменения испарения для соответствующих  $\Delta T$  меняют знак на обратный, а их абсолютная величина увеличивается на 1 мм/град.

Следует отметить, что полученные данным способом значения изменения испарения (табл. 4.11) несколько меньше, чем рассчитанные по (4.6) (см. табл. 4.9). Однако эти различия не выходят за рамки точности методов, и основной вывод заключается в том, что даже при потеплении на 2 °С как при одном, так и при другом способах расчета изменение испарения в среднем для достаточно крупного водосбора, где произрастают различные по типам и продуктивности леса, не превышает 10%.

Таблица 4.11

**Изменение средних за 140 лет роста леса значений суммарного испарения леса при изменении среднегодовой температуры воздуха ( $\Delta T$ ), °C**

Тип леса, бонитет	Мурманская область				Республика Карелия							
	Северная тайга								Средняя тайга			
	$\Delta T = 1$		$\Delta T = 2$		$\Delta T = 1$		$\Delta T = 2$		$\Delta T = 1$		$\Delta T = 2$	
	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
Сосняк												
Черничный, II									-3	-1	-1	-0.2
Черничный, III					3	1	7	2	3	1	8	2
Черничный, IV	8	2	13	3	7	2	13	3	7	2	13	3
Черничный, V	19	5	27	7	15	4	23	6	16	4	22	5
Брусничный, III					1	0.2	4	1	1	0.2	4	1
Брусничный, IV	4	1	9	2	3	1	8	2	3	1	8	2
Брусничный, V	27	7	35	10	24	6	31	8	23	6	30	7
Лишайниковый, V	8	2	16	4	8	2	15	4	7	2	14	3
Сфагновый, V	6	2	13	4	5	1	12	3	11	3	19	5
Сфагновый, Va	9	3	20	6	6	2	15	4	6	2	14	4
Сфагновый, Vб	21	6	38	12	16	4	26	7	16	4	25	7
Ельник												
Черничный, III					7	2	7	2	13	3	17	4
Черничный, IV	-9	-2	-7	-2	-10	-2	-7	-2	-5	-1	0	0
Черничный, V	8	2	14	4	7	2	12	3	5	1	12	3
Березняк												
Кисличный, I									-1	-0.2	-6	-1
Черничный, II					1	0.2	4	1	0	0	-5	-1
Черничный, III	-2	0.5	1	0.3	0	0	2	0.5	-2	-0.5	-7	-2

#### 4.1.4. Роль рубок ухода в преобразовании испарения

Рубки ухода в производных лесах выполняют для улучшения качественного состава насаждений и с целью повышения эффективности лесного фонда, в том числе за счет более раннего пользования древесиной. Второй фактор, особенно в районах, где леса многие годы интенсивно эксплуатируются, играет в настоящее время важную роль в развитии этого вида хозяйственной деятельности. Уход начинается с момента смыкания крон молодого насаждения и заканчивается за 10–20 лет до главной рубки.

Преобразование физиологических процессов древостоя, в том числе и транспирации, после рубок зависит от многих факторов. После разреживания насаждения рубками улучшаются условия питания и освещения, происходят изменения в структуре фитомассы древостоя в основном за счет повышения доли хвой и охвоенных ветвей (отмечается также и увеличение массы мелких корней) [172], в результате отдельные деревья обычно увеличивают прирост вследствие роста интенсивности обменных процессов (транспирации в том числе). Но так как при этом снижается количество стволов на единице площади, итоговое изменение текущего прироста насаждения и транспирации зависит от сочетания интенсивности выборки, с одной стороны, и возраста и бонитета насаждения, с другой. Наиболее высокий эффект ухода соответствует древостою лучших бонитетов и более молодого возраста, поэтому рубки ухода назначаются в насаждениях не ниже IV класса бонитета. Нужно отметить, что имеются данные, свидетельствующие как об увеличении текущего прироста, так и о его снижении (рис. 4.16). В этой связи можно ожидать как положительного, так и отрицательного гидрологического эффекта, т. е. увеличения транспирации с участка, пройденного рубками, или его уменьшения.

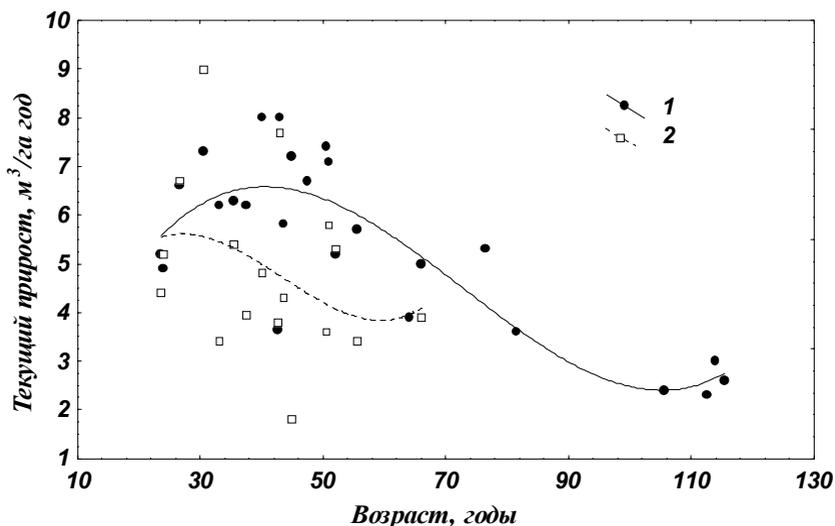


Рис. 4.16. Зависимость текущего прироста сосняков от их возраста (1 – насаждение, пройденное рубкой ухода, 2 – контрольное насаждение)

Независимо от последующих реакций древостоя на рубки, в первые годы после проведения этих работ испарение снижается. По расчетам получено, что годовое испарение снижается после рубок в зависимости от типа и возраста леса в пределах от 3 мм (~1%) до 80 мм (~18%). Из-за разреживания полога снижаются транспирация и испарение осадков, задержанных пологом леса, но возрастает испарение с наземного покрова. Пример результатов расчета изменения испарения, полученных только с использованием рекомендаций по выполнению рубок ухода в хвойном лесу в Карелии [135], приведен в табл. 4.12.

Таблица 4.12

**Изменение испарения с хвойного леса в результате рубок ухода (числитель – среднетаежная подзона, знаменатель – северная подзона)**

Состав	Бонитет, класс	Возраст, лет	Полнота	Испарение, мм		
				до рубок	после рубок	изменение
Уход за молодняками						
10Е	II	20/30	0.9/1.0	365/399	345/356	20/43
10Е	III	20/30	0.9/1.0	355/375	342/342	13/33
10Е	IV	20/30	1.0/1.0	344/345	340/330	4/15
10С	II	20/30	0.9/1.0	404/423	383/387	21/36
10С	III	20/30	0.9/1.0	400/404	380/376	20/28
10С	IV	20/30	1.0/1.0	382/395	373/375	9/20
Прореживания						
10Е	II	30/40	0.7/0.7	367/374	343/348	24/26
10Е	III	30/40	0.7/0.7	355/374	341/348	14/26
10Е	IV	35/45	0.7/0.7	359/358	343/344	16/14
10С	II	30/40	0.7/0.7	403/402	379/381	24/21
10С	III	30/40	0.7/0.7	396/403	376/382	20/21
10С	IV	35/45	0.7/0.7	387/402	374/384	13/18
Проходные рубки						
10Е	II	50/60	0.8/0.8	393/376	355/343	38/33
10Е	III	50/60	0.8/0.8	395/377	356/343	39/34
10Е	IV	60/70	0.8/0.8	385/373	356/346	29/27
10С	II	50/60	0.8/0.8	413/388	387/367	26/21
10С	III	50/60	0.8/0.8	416/395	388/371	28/24
10С	IV	60/70	0.8/0.8	418/393	393/374	25/19

Выборка древостоя по запасу при выполнении рубок изменяется в сравнительно узком диапазоне (ее максимальную величину рекомендуется для хвойного леса принимать от 20 до 35% [135]). Такие небольшие колебания слабо влияют на вариацию изменения водного баланса в лесу. Поэтому существуют тесные корреляционные зависимости между изменением испарения и суммарным испарением с хвойного леса до рубок (рис. 4.17). Эти зависимости могут быть использованы для прогноза преобразования влагооборота леса в результате рубок ухода. В среднем испарение в сосняке после рубок ухода уменьшается на 6–7%, а в ельнике – на 12–13% (см. табл. 4.12).

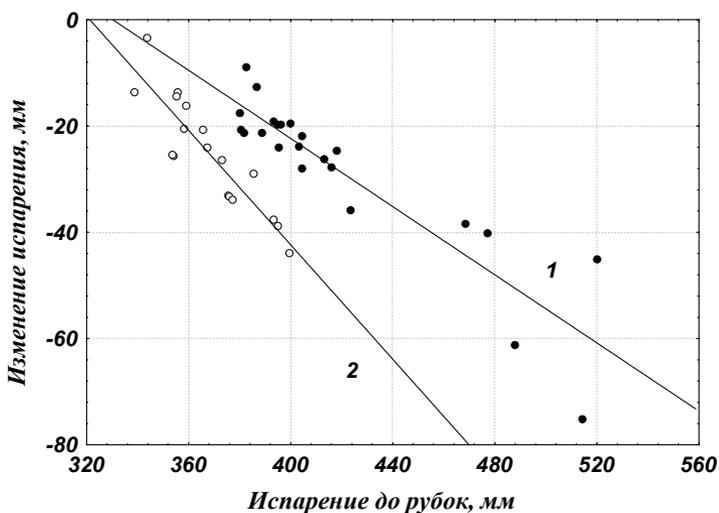


Рис. 4.17. Изменение испарения с леса после рубок ухода в зависимости от начального испарения (1 – сосновый лес, 2 – еловый лес)

Самые значительные изменения водного баланса после рубок происходят в высокопродуктивных лесах, возраст которых соответствует максимальному приросту древесины. Такие леса характеризуются наиболее высоким влагопотреблением. Из этого следует, что при прочих равных условиях наименее ощутимыми для водного баланса являются рубки ухода за молодняками. Большие изменения происходят после прореживания и проходных рубок. Различия антропогенных составляющих испарения в зависимости от вида рубок могут превышать 100% (см. табл. 4.12).

Меньшие изменения испарения происходят после рубок ухода в лиственных и смешанных лесах при удалении лиственных пород древостоя. Это объясняется различием структуры суммарного испарения с лиственных и хвойных лесов. Кроны последних задерживают за год большее количество осадков. Поэтому данная составная часть суммарного испарения играет меньшую роль во влагообороте лиственного леса, чем испарение с наземного покрова, которое в значительной степени компенсирует снижение испарения задержанных осадков и транспирации.

Следует отметить, что возрастная динамика годового испарения с леса практически не претерпевает изменений в первые 4 года после рубок ухода. Этот вывод сделан на основании анализа опубликованных результатов исследований в лесах Карелии, проведенных В. В. Дьяконовым и А. А. Иванчиковым [59]. Выполненные нами расчеты по таксационным характеристикам, приведенным в этой работе, свидетельствуют о снижении испарения после прореживания 50-летнего леса на 14% (с 520 до 445 мм) на одной пробной площадке и на 8% (с 477 до 437 мм) на второй площадке. В последующие 4 года вследствие роста леса и увеличения биомассы испарение на этих площадках увеличилось примерно на 3 и 2% соответственно. На контрольной площадке, представленной лесом того же возраста и состава, испарение за этот же 4-летний период также увеличилось на ~3%, при этом оно оставалось на 8–12% выше, чем на участках после прореживания (табл. 4.13).

Таблица 4.13

**Влияние прореживания древостоя на испарение**

Состав, возраст	Состояние	Испарение, мм			
		древостоя	осадков с крон	с наземного покрова	суммарное
6С2Е2Б+Ос, 50	до рубок	236	205	79	520
7С2Е1Б, 50	после рубок	153	160	132	445
7С2Е1Б, 54	спустя 4 года	168	171	119	458
8С1Е1Б+Ос, 50	до рубок	199	171	107	477
7С2Е1Б, 50	после рубок	143	153	141	437
7С2Е1Б, 54	спустя 4 года	152	159	133	444
7С2Е1Б+Ос, 50	контроль	202	189	96	487
7С2Е1Б+Ос, 54	контроль	216	195	88	499

#### 4.1.5. Относительное и абсолютное изменение испарения в результате рубок

В главе 2 было указано, что относительная оценка влияния рубок на элементы водного баланса представляет собой разницу этих величин, полученных для спелого производного леса до рубки и для участка вырубленного леса на любой интересующей нас стадии его развития.

Для получения абсолютной оценки влияния рубок на испарение и сток рассчитывается разница между их исходными величинами, полученными для коренного леса того же типа и продуктивности, что и вырубаемый, и величинами, вычисленными для каждого конкретного возраста в период развития леса после рубок.

К сожалению, найти полный набор таксационных характеристик, необходимых для расчета суммарного испарения с различных типов и классов бонитета коренных лесов, не представляется возможным. Поэтому в настоящее время сложно получить абсолютную оценку влияния рубок на водный баланс для всего разнообразия произрастающих на территории ЕСР лесов. Вместе с тем, только эта оценка дает возможность в полной мере представить роль человека в формировании современных гидрологических условий интересующего нас водосбора. В этом случае важно получить разницу между абсолютной и относительной оценками хотя бы для некоторых типов леса.

Данная задача решалась для ельника черничного и сосняка брусничного среднетаежной подзоны, таксационные характеристики которых приведены в [34]. Некоторые расчетные таксационные характеристики, величины составных частей и итоговое значение суммарного испарения с рассматриваемых коренных лесов приведены в табл. 4.14.

Таблица 4.14

#### Испарение с коренного леса, произрастающего в средней подзоне тайги

Тип леса	$m$ , т/га	$LAI$ , га/га	$E_t$ , мм	$E_{is}$ , мм	$E_s$ , мм	$E$ , мм
Сосняк брусничный	8.17	2.86	155	101	153	409
Ельник черничный	20.7	5.98	196	192	60	448

Абсолютные и относительные оценки влияния рубок на испарение для этих типов леса приведены в табл. 4.15. Нужно отметить, что и для коренного леса, и для производного расчеты выполнялись по методу Крестовского. В качестве исходной величины для получения относительной оценки принято испарение с производного леса 100-летнего возраста. Наглядное представление о возрастных изменениях как относительной, так и абсолютной оценки можно получить из рис. 4.18.

Таблица 4.15

**Относительное ( $\Delta E_{om}$ ) и абсолютное ( $\Delta E_{abs}$ ) изменение испарения производного леса в среднетаежной подзоне**

Возраст, лет	Сосняк брусничный			Ельник черничный		
	$E$ , мм	$\Delta E_{om}$ , мм	$\Delta E_{abs}$ , мм	$E$ , мм	$\Delta E_{om}$ , мм	$\Delta E_{abs}$ , мм
0	186	228	223	203	250	245
10	345	69	64	368	85	80
20	381	33	28	359	94	89
30	397	17	12	375	78	73
40	407	7	2	416	37	32
50	411	3	-2	439	14	9
60	413	1	-4	450	3	-2
70	415	-1	-6	454	-1	-6
80	414	0	-5	455	-2	-7
90	415	-1	-6	454	-1	-6
100	414	0	-5	453	0	-5
110	413	1	-4	452	1	-4
120	412	2	-3	448	5	0
130	412	2	-3	445	8	3
140	412	2	-3	444	9	4

*Примечание.*  $\Delta E_{om}$  – разница между испарением с производного (эксплуатируемого) леса 100-летнего и  $i$ -того возраста;  $\Delta E_{abs}$  – разница между испарением с коренного леса и с производного  $i$ -того возраста.

Наибольшее влияние рубок на испарение для лесов этой продуктивности отмечается в первые 40 лет после облесения вырубок. Для старших возрастов величины как относительной, так и абсолютной оценки в основном не превышают 10 мм. Такая динамика характерна для достаточно продуктивных лесов. В менее продуктивных лесах восстановление древостоя идет медленнее, поэтому значительное влияние рубок на водный баланс прослеживается в старшем возрасте.

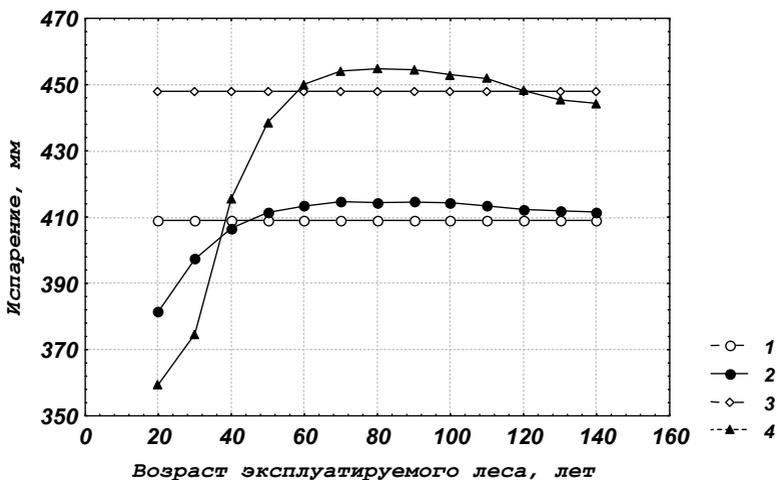


Рис. 4.18. Возрастные изменения суммарного испарения с эксплуатируемых сосняка брусничного (2) и ельника черничного (4) (для сравнения показано испарение с коренных сосняка брусничного (1) и ельника черничного (3))

Важнейший в данном случае вывод можно сделать при сравнении абсолютной и относительной оценок: их расхождения в течение всего периода роста леса не превышают 10 мм (см. табл. 4.15). Можно предполагать, что такой вывод является справедливым и для других типов леса.

#### 4.1.6. Оценка пространственного распределения испарения с производного леса

На пространственное распределение испарения с леса влияют, как это было показано выше, климатические характеристики и продуктивность лесов. Основным фактором, лимитирующим испарение на территории ЕСП, является солнечная радиация, поступление которой увеличивается в южном направлении. В соответствии с этим меняется в целом и продуктивность лесов, повышаясь с севера на юг. Такая генерализованная схема распределения испарения с леса представлена на карте Ю. Л. Раунера [32, 158]. Эту карту и рекомендуется в настоящее время использовать для определения этого элемента водного баланса на лесных водосборах.

Вместе с тем влияние таких факторов, как геологическое строение местности, рельеф и гидрологические условия определяют пространственные вариации лесорастительных условий и продуктивности лесов даже при одинаковых климатических характеристиках, вследствие чего варьирует по территории и испарение с леса (раздел 4.1.2). Значительное влияние на пространственное распределение испарения оказывает эксплуатация лесов, в результате которой формируются насаждения, различающиеся по возрастной структуре. Только наличие вырубок и различного по возрасту древостоя определяет пространственные колебания испарения до 20–50%. При таких условиях использование карты Ю. Л. Раунера для малых водосборов, где интенсивно ведутся лесозаготовки и продуктивность лесов значительно отличается от средней для данного региона, может привести к заметным погрешностям.

Для определения испарения с малых лесных водосборов должны использоваться карты, учитывающие основные признаки, которые определяют наибольшие колебания испарения с леса: возраст, продуктивность и порода. Такие карты были построены для территории ЕСР. При этом суммарное испарение было рассчитано для 16 сочетаний классов бонитета и типов леса, приведенных в табл. 1.10 (10 – сосняков, 3 – ельников, 3 – березняков). Для характеристики возрастной динамики испарения расчет для основных бонитетов хвойных лесов выполнялся через 20-летние интервалы (от 20 до 160 лет), для лиственных – через 10-летние интервалы (от 20 до 100 лет).

Для расчетов использовались данные 48 пунктов наблюдений метеорологической сети, характеризующие метеорологические и климатические условия территории распространения лесов северной, средней и южной тайги на ЕСР. При расчете испаряемости использовались наблюдения по 68 метеорологическим станциям. К основным метеорологическим элементам, необходимым для расчета, относятся месячные величины влажности воздуха, дефицита влажности воздуха, температуры воздуха и осадков с поправками на ветровой недоучет. Эти значения брались из [136]. Таксационные характеристики (средняя высота древостоя и запас стволовой древесины) рассчитывались по уравнениям (1.8) и (1.8') для каждой возрастной ступени. Эти метеорологические и таксационные характеристики использовались при расчете испарения по методу Крестовского.

Следует отметить, что важной характеристикой леса, влияющей на испарение с него, является полнота древостоя. Этот показатель косвенно учитывался уравнениями (1.8) и (1.8').

Анализ полученных картин пространственного распределения испарения позволил объединить построенные для различных типов леса карты по породам, классам бонитета и возрастным группам. Для всей территории ЕСР построены карты испарения насаждений IV и V классов бонитета. Такая продуктивность древостоя близка к средней для ЕСР. В северной подзоне тайги леса лучших бонитетов занимают незначительные площади, поэтому карты испарения насаждений II–III классов бонитета построены только для средней и южной тайги. Всего предложено 35 карт (рис. 4.19–4.25) (15 карт для сосняков, 15 – для ельников и 5 – для березняков).

Наибольший интерес представляет сравнение полученных карт с классической картой среднего годового испарения с лесопокрытых территорий Ю. Л. Раунера [32, 158]. Можно отметить, что испарение с молодых лесов средней и южной подзон тайги (20–40 лет), полученное с вновь построенных карт, несколько ниже (особенно низкопродуктивных лесов V класса бонитета), чем снятое с карты Ю. Л. Раунера. С увеличением возраста и продуктивности древостоя расхождения уменьшаются. Такие результаты сравнения логичны, учитывая особенности построения карты Ю. Л. Раунера. Следует отметить, что наибольшие различия в испарении получены для таежных условий Мурманской области: представленные нами на карте величины испарения на 30–40% превышают значения, установленные по карте Ю. Л. Раунера) ( $\leq 300$  мм). Однако рассчитанные нами величины испарения в большей степени согласуются с испаряемостью, которая была получена расчетным путем [160] по данным метеостанций Мурманской области, равной в среднем для таежной зоны этой территории 380 мм. В поддержку наших данных следует отнести и приведенное А. А. Молчановым [130] достаточно высокое значение испарения с северных лесов (до 490 мм).

Все изложенное свидетельствует о правомерности использования предложенного в данной работе метода и карт. Карта же Ю. Л. Раунера незаменима для определения испарения в случаях, когда отсутствует всякая характеристика древостоя.

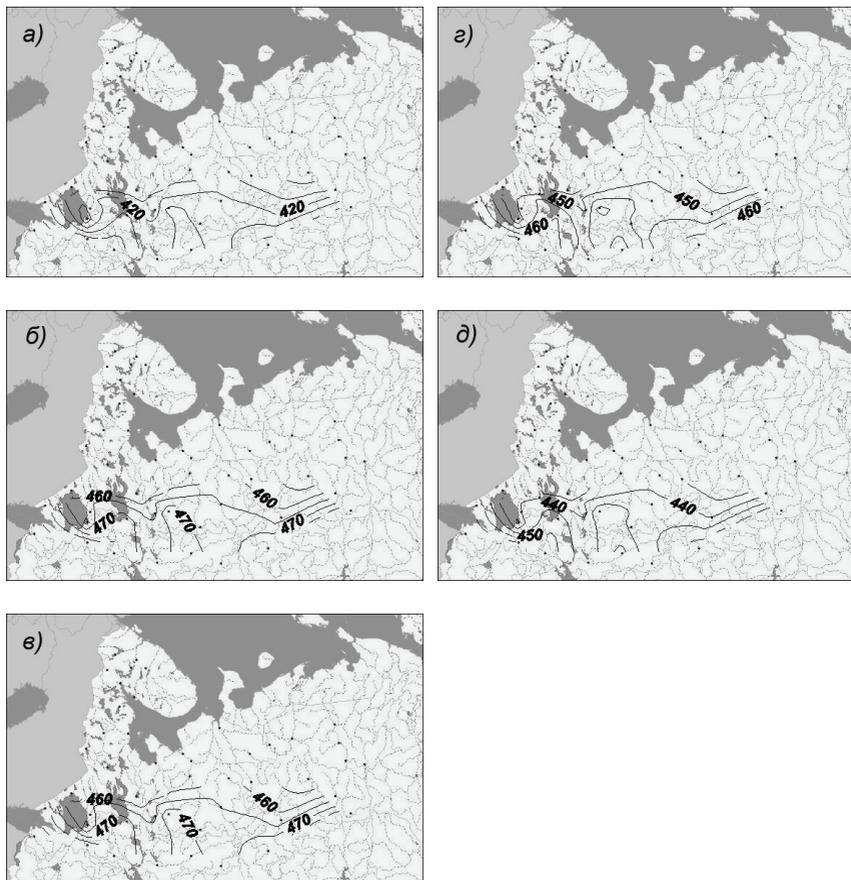


Рис. 4.19. Испарение с сосняка III класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

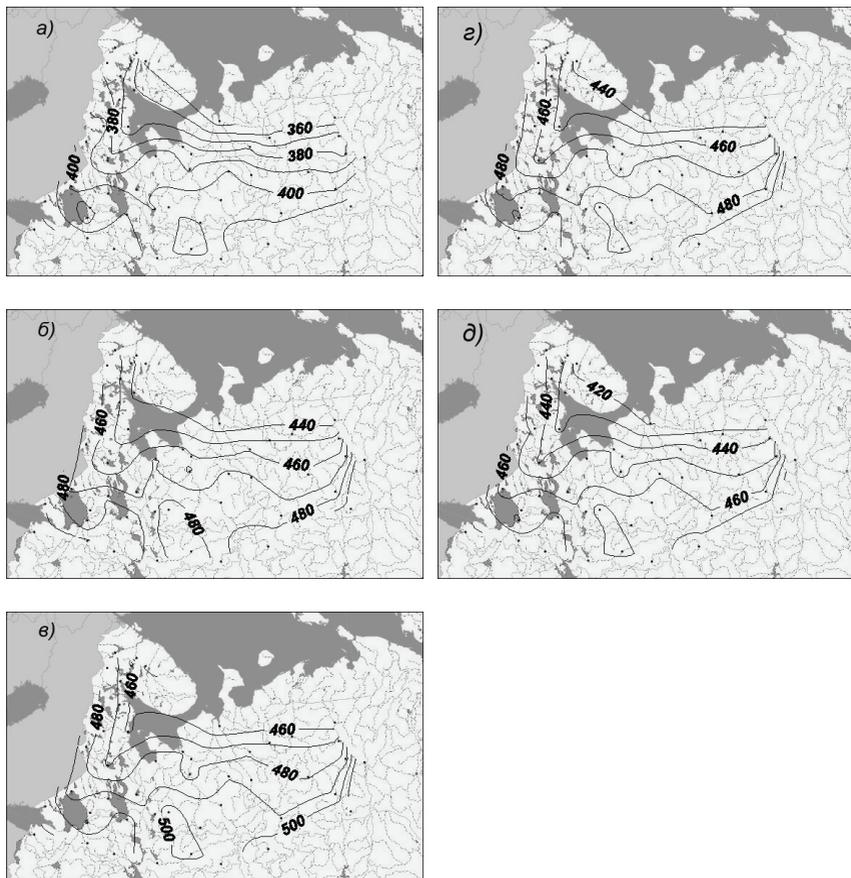


Рис. 4.20. Испарение с сосняка IV класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

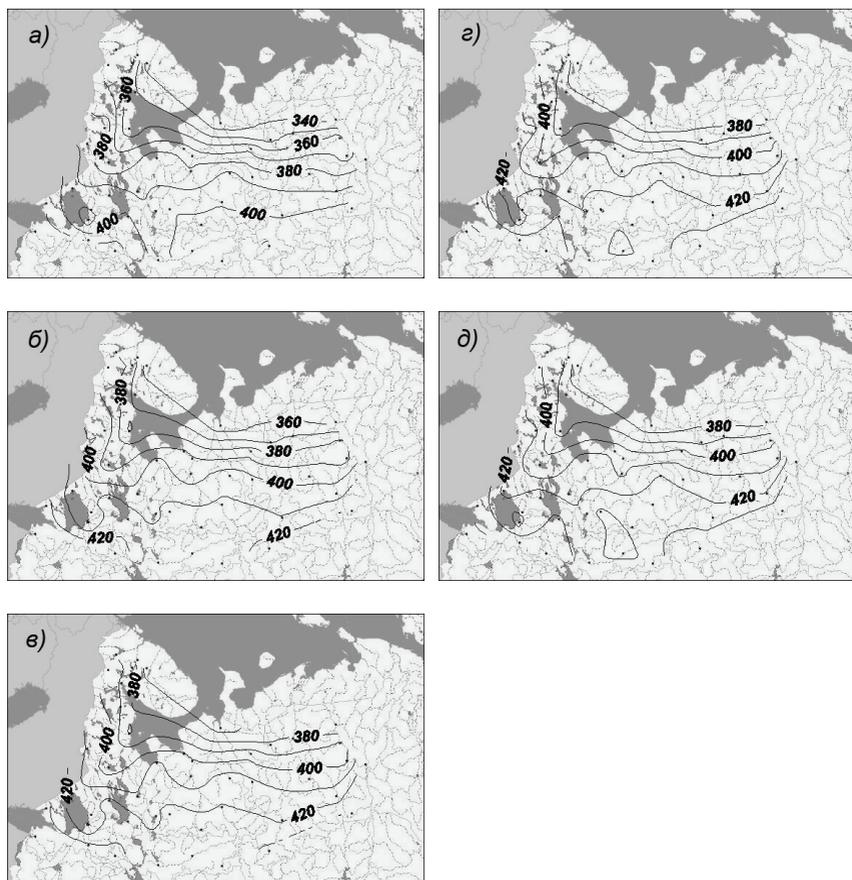


Рис. 4.21. Испарение с сосняка V класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

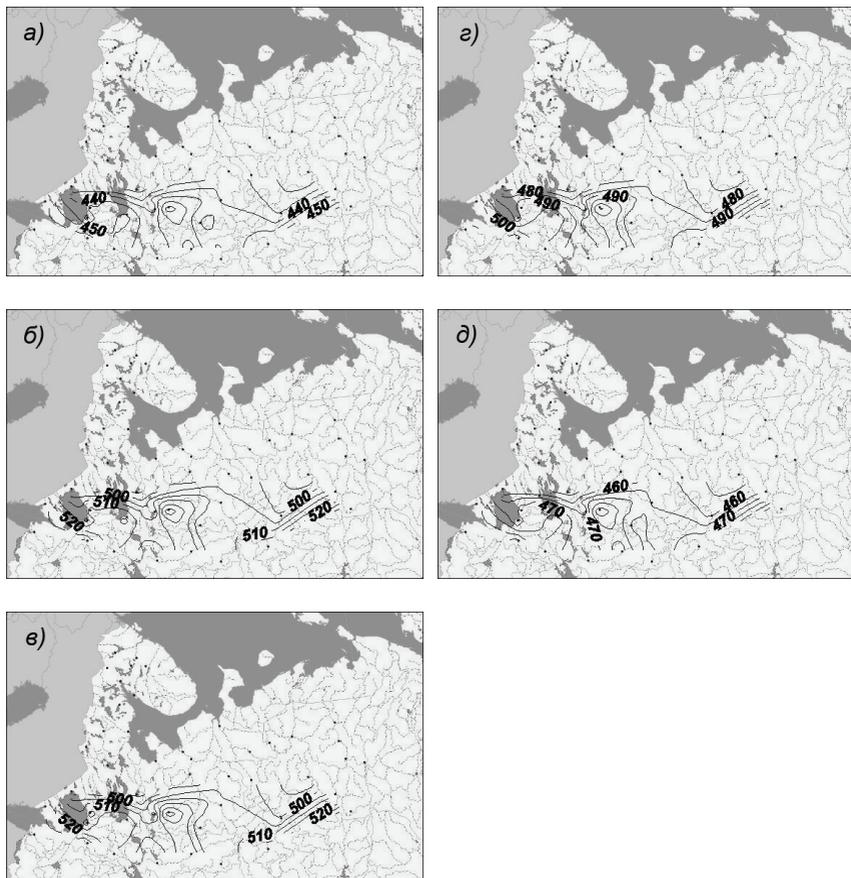


Рис. 4.22. Испарение с ельника III класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

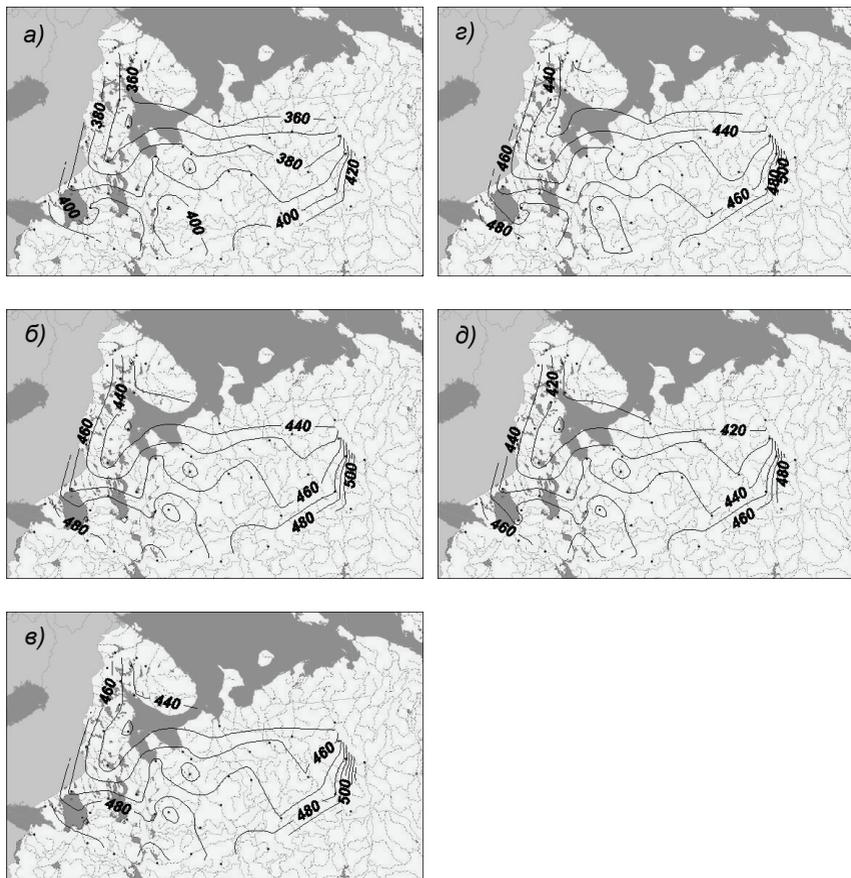


Рис. 4.23. Испарение с ельника IV класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

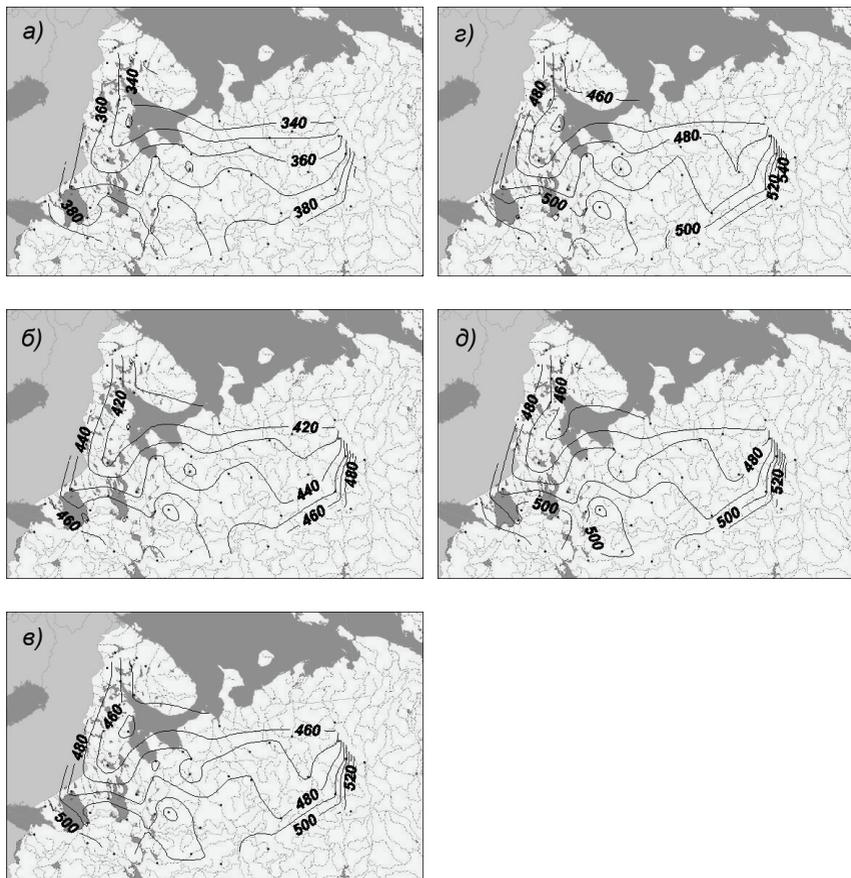


Рис. 4.24. Испарение с ельника V класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

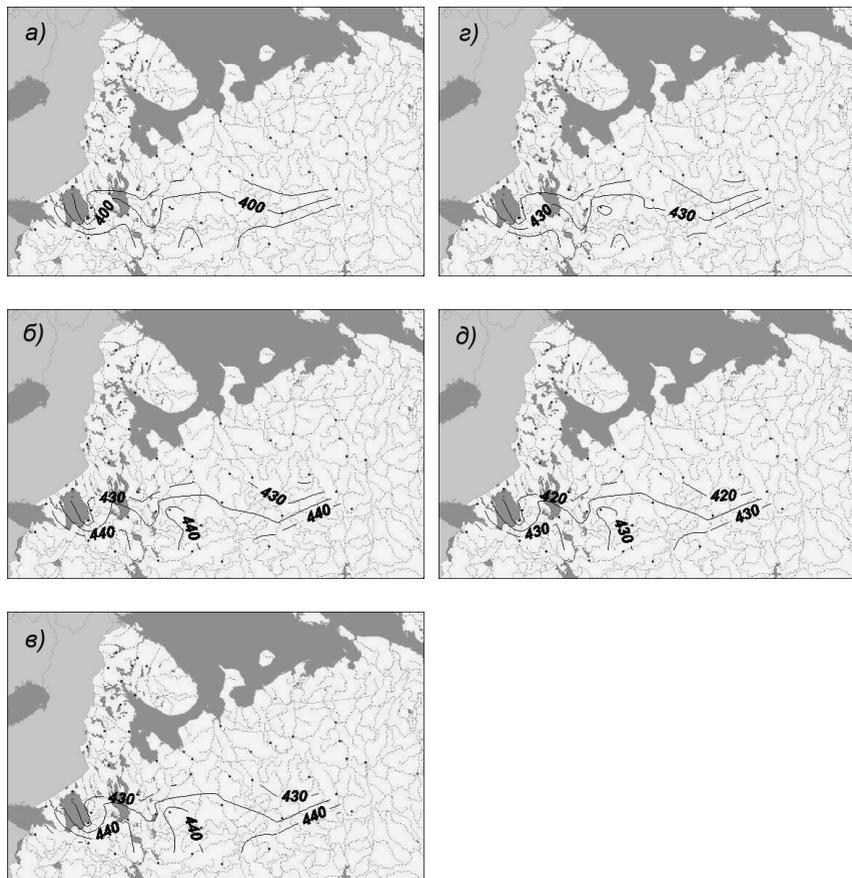


Рис. 4.25. Испарение с березняка II–III класса бонитета (а – 20 лет, б – 40 лет, в – 60 лет, г – 80 лет, д – 100 лет)

## 4.2. Изменение водно-физических характеристик и водного режима почвогрунтов после рубок

При выполнении различных рубок малоучитываемым фактором изменения при этом условий формирования элементов водного баланса является вторжение тяжелой техники в лес. Гидрологическим последствиям ее работы на сельскохозяйственных угодьях до настоящего времени уделялось значительно больше внимания [95]. Вместе с тем работа техники в лесу приводит как к изменению водно-физических свойств верхних горизонтов почвогрунтов, так и к нарушению состояния наземного растительного покрова. При рубках ухода наблюдается еще и повреждение растущих деревьев (срыв коры, порезы, обдиры, сдавливание ствола и корней, обрыв питающих корешков и др.) [13], что может сказаться на интенсивности их транспирации. При этом степень проявления всех этих последствий в транспирации зависит от породы. В частности, ель, вследствие поверхностного залегания корней, страдает от повреждений больше, чем сосна и береза.

Большое внимание лесоводы отводят проблеме изменения водно-физических свойств почвогрунтов. Прежде всего это связано с тем, что уплотнение почвогрунтов, вызванное перемещением техники при проведении рубок ухода, отражается на сохранности и дальнейшем формировании корневой системы и, следовательно, на интенсивности физиологических процессов, в том числе и на транспирации. Последствия применения лесной техники при сплошных рубках выражаются в изменении условий для последующего восстановления леса на вырубках. К сожалению, в настоящее время оценить влияние уплотнения почвогрунтов и повреждение деревьев при перемещении техники на транспирацию после рубок ухода не представляется возможным. Справедливым будет только утверждение, что эти последствия работы техники приводят к некоторому снижению расхода влаги древостоем и суммарного испарения с леса в целом. Однако получить приближенную оценку влияния уплотнения на процесс стока воды можно.

Наибольшей деформации подвергается почва в местах воздействия ходовой части машин, где образуется колея: на погрузочной площадке и волоке (технологический коридор). Однако уплотнение

почвогрунтов в той или иной степени отмечается по всей ширине волока и погрузочной площадки, а также при использовании определенной технологии рубок ухода, и на пасеке. При этом в зависимости от применяемой технологии доля волоков составляет 15–30% от площади всей лесосеки [13].

Отмечается рост средней плотности верхних горизонтов почвогрунтов лесосеки с увеличением интенсивности рубок. Наибольшее уплотнение наблюдается, когда вырубается практически вся древесина [15]. Максимальной нагрузке подвергаются почвогрунты при проведении рубок главного пользования.

Грунты с жестким скелетом, особенно песчаные и гравелистые, обладают, как правило, меньшей сжимаемостью по сравнению с другими грунтами. Изменение коэффициента пористости при действии уплотняющей нагрузки зависит от их гранулометрического состава [206]. Так, при 1–2 проходах техники плотность песков увеличивается на 1.5–7.6%, супеси – на 7.8–14.7%, легких суглинков – на 15.6–25.7% в зависимости от массы агрегата [177]. Кроме уже указанных факторов (вид техники, гранулометрический состав почв), на степень уплотнения влияет наличие и мощность подстилки [74, 106, 150, 151, 177, 216]. Мощность слоя, где наблюдается уплотнение, как это следует из результатов наблюдений многих исследователей, составляет 30–40 см.

Увеличение объемной массы, что является непосредственным следствием работы техники в лесу, сопровождается изменениями узловых точек влагоемкости (полной влагоемкости, наименьшей влагоемкости, влажности завядания) и процессов перемещения влаги в почвогрунтах. Изменение инфильтрации приводит к увеличению поверхностной составляющей стока воды и к некоторому преобразованию внутрисезонного распределения стока. В случае сплошной рубки древостоя этот эффект многократно усиливается исчезновением транспирации древостоя. В условиях достаточного увлажнения, что характерно для территории ЕСР, уменьшение инфильтрационной способности почвогрунтов явно не отражается на годовых значениях испарения и стока. Влияние этого фактора на испарение может проявляться через растительный покров, состояние и видовое разнообразие которого зависит от плотности почв и от режима влажности корнеобитаемого слоя. В частности, на

заболачивание некоторых вырубок, вызванное в первую очередь резким снижением испарения с участка, определенное влияние оказывает и уплотнение почвогрунтов.

Важными характеристиками почвогрунтов, влияющими на формирование стока, являются полная и наименьшая влагоемкости, а также влажность завядания. Нужно отметить, что влажность, при которой начинается засыхание растений, наблюдается в исследуемом регионе достаточно редко, только ограниченный по времени период и только на легких по гранулометрическому составу почвогрунтах.

Наименьшая влагоемкость и влажность завядания в большой степени зависят от количественного состава различных по размерам фракций, образующих исследуемые почвогрунты. Поэтому их уплотнение, которое происходит без изменения состава, не должно существенно влиять на значения этих водно-физических характеристик.

Уменьшение пористости и соответствующего ей значения полной влагоемкости может привести к снижению аэрированности корнеобитаемого слоя ниже допустимых границ, особенно на волоке, и, следовательно, к угнетению растений. Такое положение наблюдалось в черничных и брусничных группах типов леса во Владимирской области, где в верхнем горизонте почв на волоке доля свободных пор опускалась ниже 15–20% (допустимый уровень для трав) [219]. Поэтому, а также из-за нарушения поверхностного слоя почв ходовой частью машин, на волоке и на всех частях вырубок, где перемещалась техника, в первый год после рубок наблюдаются места, свободные от растений, что приводит к снижению испарения с наземного покрова.

Полная влагоемкость принимается равной пористости и рассчитывается по формуле:

$$W_{fv} = 1000 h(1 - \rho/\gamma), \quad (4.7)$$

где  $W_{fv}$  – полная влагоемкость, мм;  $\gamma$  – плотность твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – объемная масса, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – мощность расчетного слоя, м.

Анализ опубликованных работ показывает, что плотность почв на волоке в первый год после рубок по сравнению с пасекой возрастает в зависимости от указанных выше факторов в 1.2–1.9 раза. А наибольшие пределы колебаний полной влагоемкости достигают 20–30 мм (от 80–70 до 55–50 мм).

Для определения наименьшей влагоемкости Б. Н. Мичуриным [126] была предложена формула:

$$W_{nw} = 135 (\rho / \gamma)(1 - \rho / \gamma), \quad (4.8)$$

где  $W_{nw}$  – объемная наименьшая влагоемкость, %;  $\gamma$  – плотность твердой фазы, г/см<sup>3</sup>;  $\rho$  – объемная масса, г/см<sup>3</sup>.

Формулу (4.8) можно применять для тяжелых по гранулометрическому составу почвогрунтов, объемная масса которых выше 1000 кг/м<sup>3</sup>. В работе [77] наименьшую влагоемкость при уплотнении почв, вызванном мелиорацией сельскохозяйственных угодий, рекомендуется определять по следующим эмпирическим формулам:

в суглинках

$$W_{nw} = 66.4 - 30.1 \rho, \quad (4.9)$$

в супесях

$$W_{nw} = 108 \exp(-1.67 \rho), \quad (4.10)$$

где  $W_{nw}$  – наименьшая влагоемкость, в процентах от массы сухого грунта.

Выполненные расчеты с определенной степенью достоверности показали, что изменения наименьшей влагоемкости происходят в меньших пределах, чем полной влагоемкости. Причем на величину изменения, а также его знак не влияет используемый метод. В зависимости от степени уплотнения, объемной массы и гранулометрического состава отмечается как снижение до 10 мм, так увеличение до 10 мм наименьшей влагоемкости.

Влажность завядания по рекомендации Б. Н. Мичурина следует определять по формуле:

$$W_{wz} = 35 \rho / \gamma, \quad (4.11)$$

где  $W_{wz}$  – влажность завядания, в процентах от объема.

По данным наших расчетов с использованных опубликованных данных о плотности твердой фазы и объемной массы и формулы (4.11), эта величина в верхнем 10-сантиметровом слое при уплотнении возрастает, однако ее рост не превышает 10 мм. При таких изменениях влажности завядания можно ожидать более частого наступления периодов со сниженным испарением с наземного покрова, хотя к существенному изменению суммарного испарения это, по-видимому, не приведет.

Уменьшение  $W_{fw}$  и  $W_{nw}$  в первый год после рубок может сопровождаться дополнительным сбросом воды. Такой вывод обоснован

тем, что в исследуемом районе в некоторые периоды (в частности, после весеннего половодья) водосборы насыщаются до состояния, которое соответствует по А. Г. Булавко [26] «уровню нормального увлажнения», а по О. И. Крестовскому [99] – «динамически равновесной емкости» [83]. Это состояние наступает при влагозапасах почвогрунтов в пределах между наименьшей и полной влагоемкостями (при достаточно глубоком залегании грунтовых вод почвогрунты насыщаются до наименьшей влагоемкости, а при близком к поверхности – до полной влагоемкости). При установлении такого насыщения вся поступающая после этого влага (за исключением потерь на испарение) немедленно стекает в речную сеть, а большая часть оставшейся в почвогрунтах – испаряется. Поэтому наибольшая величина дополнительного сброса воды будет соответствовать изменению после проведения рубок ухода полной влагоемкости, а наименьшая – изменению наименьшей влагоемкости. Принимая, что во всем 40-сантиметровом слое величина изменения плотности с глубиной снижается по линейному закону, получаем максимальную величину дополнительного сброса воды в речную сеть с волока, равную ~40–60 мм. Минимальная величина этого сброса (при максимальном изменении  $W_{mv} = 10$  мм), как показывают расчеты, составляет ~20 мм. В среднем можно принять, что дополнительный сток с отведенных для перемещения техники участков при рубках составляет 30–40 мм. По различным источникам доля этих участков ограничивается 30%, следовательно, со всей лесосеки стекает дополнительно после рубок около 9–12 мм.

В исследуемом регионе на отдельных слабодренлируемых или с близким залеганием грунтовых вод участках волоков и погрузочных площадок может наблюдаться уменьшение испарения из-за избытка влаги и снижения аэрированности корнеобитаемого слоя. Из всего изложенного следует, что в первый год следует ожидать наибольшего прироста стока с лесного участка, пройденного рубками. Его величина определяется суммой изменения испарения и дополнительного стока, вызванного уплотнением почвогрунтов на волоках.

После воздействия водно-физические свойства почвогрунтов постепенно восстанавливаются. Однако их изменения в супесчаных и суглинистых почвогрунтах прослеживаются долгое время, о чем свидетельствуют данные, полученные в лесах Карелии [79], и

результаты исследований, приведенные в работе [176]. Авторы этой работы отмечают, что даже через 10–15 лет после лесозаготовок водно-физические характеристики почвогрунтов еще не достигают начальных значений, хотя плотность верхних горизонтов и уменьшается на 14–24%, а пористость возрастает на 13–16%. На основании анализа опубликованных данных можно предполагать, что в среднем в супесчаных и суглинистых почво-грунтах процесс восстановления их водно-физических свойств растягивается на 30–40 лет.

### **4.3. Формирование снежного покрова на лесных водосборах**

#### **4.3.1. Существующие мнения о влиянии леса на снегонакопление**

Лесохозяйственная и лесопромышленная деятельность в таежной зоне, вероятно, не приводит к значительным изменениям количества атмосферных осадков на сравнительно больших территориях, что уже отмечалось выше. Однако появление или зарастание вырубок может привести к некоторому изменению в пространственном распределении запасов воды в снегу на водосборе. Существенную роль в распределении снегозапасов играет структура лесного фонда на водосборе.

В литературе отмечается зависимость снегонакопления от некоторых характеристик леса, в частности, от породного состава. Установлено, что в хвойных лесах с увеличением плотности древостоя, сомкнутости крон и массы хвои снижаются снегозапасы [37, 92, 131, 157], наименьшее количество снега накапливается в высокополнотных еловых насаждениях, а наибольшее – в лиственных лесах. Сосновые леса занимают промежуточное положение [159, 163].

Увеличением площади испаряющей поверхности в условиях леса объясняется тот факт, что под кронами древостоя, по данным ряда исследователей, накапливается снега меньше, чем на открытых участках [16, 67, 78, 118, 143, 168]. Вместе с тем, во многих случаях отмечается положительная роль леса в снегонакоплении [131, 152, 159, 163, 191, 217]. В частности, превышение лесных снегозапасов над полевыми в Карелии по литературным данным составляет 17–23% [190]. Это можно объяснить увеличением осадков

над лесом, разницей в интенсивности снеготаяния в период зимних оттепелей и повышенным испарением на открытых участках, которое, по мнению А. К. Дюнина [60], существенно возрастает при метелевом переносе снега.

По мнению ряда авторов, лес не вызывает заметного увеличения количества твердых осадков [152, 194]. Основываясь на данных наблюдений в районе г. Валдая, в Подмоскowie и в Смоленской области, В. А. Шутов [217] утверждает, что основными факторами, определяющими разницу снеготаяния в лесу и в поле, являются сумма положительных температур за зимний период и породный состав древостоя. Однако по выводам В. В. Рахманова [159], положительная роль леса в снеготаянии проявляется и в безоттепельные периоды, что может свидетельствовать как о повышенном испарении в поле, так и о большей величине осадков над лесом. Однако последнее, по его мнению, для сильно залесенных территорий маловероятно.

Таким образом, до настоящего времени не существует единого мнения в оценке роли факторов формирования снеготаяния на водосборах лесной зоны. В то же время определение значения леса в снеготаянии важно при изучении влияния лесохозяйственных работ на гидрологический режим водных объектов и условий формирования качественного состава вод. Все это подчеркивает необходимость получения количественных оценок роли факторов, определяющих снеготаяние на различных ландшафтах и в различных регионах.

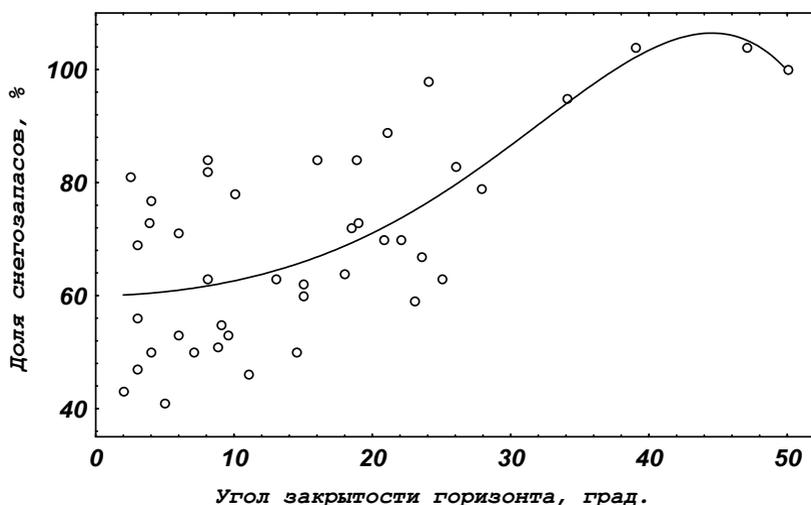
#### 4.3.2. Влияние площади полей и вырубок на снеготаяние

Формирование снежного покрова на открытых участках в лесу зависит от многих факторов, среди которых значительную роль играют их размеры, что показано во многих отечественных и зарубежных работах [131, 143, 194, 226, 227]. Зависимость снеготаяния от величины лесных полей объясняется разницей в проявлении таких факторов, как испарение, снеготаяние в период зимних оттепелей, снеготаяние при метелевых переносах. Выделить роль каждого из этих факторов в настоящее время не представляется возможным, что отмечается и в работе [227]. Считается, что

размер полян влияет и на количество выпавших осадков за счет аэродинамического эффекта и экранирующего действия стены леса, окружающей поляну [194]. Результатом аэродинамического эффекта является изменение направления воздушного потока и снижение скорости ветра над поляной, что приводит к увеличению вероятности возрастания количества выпавших осадков. В противоположность этому экранирующее влияние древостоя отрицательно отражается на величине осадков и снегонакоплении. Действие последнего фактора преобладает на малых полянах, с увеличением их размеров усиливается роль аэродинамического эффекта [194].

На основании данных трехлетних наблюдений в лесах Карелии, выполненных сотрудниками Института леса КарНЦ РАН [87], получена ясно выраженная зависимость максимальных предвесенних запасов воды в снегу от размеров открытых участков, которые характеризовались величиной угла закрытости горизонта в центре ( $\alpha$ ) (рис. 4.26). Снегозапасы представлены в процентах относительно их величины на полянах с углом закрытости горизонта  $50^\circ$  ( $S_{50}$ ). Полученная в Карелии зависимость описывается полиномом третьей степени [87]:

$$S_{50} = 63.385 - 1.048\alpha + 0.098\alpha^2 - 0.001\alpha^3. \quad (4.12)$$



Данная зависимость показывает, что при высоте древостоя 20–25 м наибольшие снегозапасы наблюдаются на полянах или вырубках площадью 0.2–0.3 га и снижаются как при уменьшении площадей, так и при их увеличении. При площади более 1 га влияние размеров полян на снегонакопление незначительно. На таких участках наблюдаются наименьшие снегозапасы (см. рис. 4.26). Средние пределы колебаний предвесенних запасов воды в снегу на полянах, обусловленных их размерами, составляют около 40%. Показанная на рис. 4.26 зависимость хорошо согласуется с зависимостью, полученной С. Ф. Федоровым [194] по данным наблюдений за атмосферными осадками на различных по величине полянах. Поэтому можно предполагать, что основным фактором, определяющим влияние размеров полян на снегонакопление, является особенность поступления атмосферных осадков к поверхности земли.

#### 4.3.3. Влияние температурного фактора на разницу снегозапасов в лесу и в поле

Влияние температурного фактора на снегонакопление в лесу и в поле на территории Карелии исследовалось с использованием данных наблюдений за формированием снежного покрова на 18 станциях и постах гидрометеослужбы и на стационарах Института биологии и леса КарНЦ РАН, расположенных в южной части Карелии (среднетаежная подзона). Исследования на стационарах проводились в соответствии с методикой, принятой на сети гидрометеослужбы [125, 134].

Влияние этого фактора на соотношение снегозапасов в лесу и в поле изучалось без разделения леса по типам, так как в данных гидрометеослужбы отсутствуют подробные описания лесных маршрутов. В их кратких характеристиках указывается только породный состав древостоя, из чего следует, что снегомерные маршруты на территории Карелии проходят в хвойных, преимущественно сосновых лесах, а также в смешанных.

По данным сети гидрометеослужбы для периодов с оттепелями получена достаточно тесная связь между разностью приращений снегозапасов в лесу и в поле и суммой положительных температур. Уравнение линейной регрессии имеет следующий вид:

$$\Delta S = 0.39 + 1.9 \Sigma t_{>0}, \quad r = 0.61, \quad (4.13)$$

где  $\Delta S$  – разница между лесными и полевыми снеготаяниями, мм;  $\Sigma t_{>0}$  – сумма положительных температур за период со снежным покровом.

Из (4.13) следует, что с увеличением суммы положительных температур в зимние периоды превышение лесных снеготаяний над полевыми возрастает, а средняя разница температурных коэффициентов снеготаяния в поле и в различных типах леса равна 1.9 мм/град. Это значение соответствует имеющимся данным исследований снеготаяния на открытых и залесенных участках [181, 217]. Знак свободного члена позволяет предполагать, что и при отсутствии оттепелей накопление снега в лесу в течение зимы происходит более интенсивно, чем на открытых участках.

Детальный анализ снегонакопления в безоттепельные периоды показал, что в большинстве случаев (83%) лес играет положительную роль в формировании снежного покрова на водосборе. В среднем увеличение снеготаяний в лесу по сравнению с полем для периодов с отрицательной температурой составляет около 5 мм.

#### 4.3.4. Соотношение испарения с леса и поля в зимний период

Для оценки разницы снеготаяний в поле и в лесу в условиях Карелии использовался воднобалансовый метод. В этом случае уравнение водного баланса было представлено в следующем виде:

$$\Delta S = S_f - S_{gr} = (P_f - P_{gr}) + (a_{gr} - a_f) \Sigma t_{>0} + (E_{gr} - E_i - E_s), \quad (4.14)$$

где  $S_f$  и  $S_{gr}$  – запас воды в снегу в лесу и в поле, мм;  $P_f$  и  $P_{gr}$  – атмосферные осадки над лесом и в поле, мм;  $a_f$  и  $a_{gr}$  – температурные коэффициенты снеготаяния в лесу и в поле, мм/град;  $\Sigma t_{>0}$  – сумма положительных температур за зимний расчетный период по данным ближайшей метеостанции, град;  $E_i$ ,  $E_s$  и  $E_{gr}$  – испарение снега с крон древостоя, под пологом леса и в поле, мм.

Разницу в осадках над лесными и открытыми участками для условий Карелии с ее пересеченным рельефом и небольшими площадями безлесных участков, учитывая мнение многих исследователей, можно принять равной нулю. В этом случае уравнение (4.14) приобретает вид:

$$\Delta S = (a_{gr} - a_f) \Sigma t_{>0} + (E_{gr} - E_i - E_s). \quad (4.15)$$

Величины испарения определялись для периода декабрь – март. Испарение с поля рассчитывалось по (3.59), с наземного покрова под пологом хвойного леса – по (3.75). Определение  $E_i$  выполнялось отдельно для периода декабрь – февраль и марта. В первый период снег, как правило, лежит на кронах хвойного древостоя, что позволяет использовать формулу (3.63). В марте снега на кронах чаще всего нет, поэтому расчет выполнялся по (3.54), а значение коэффициента  $a$  принималось равным 0.01. Результаты расчетов для некоторых типов леса приведены в табл. 4.16.

Таблица 4.16

**Влияние массы хвои ( $m$ ) на отношение испарения с леса ( $E_f$ ) к испарению с поля ( $E_{gr}$ ) за декабрь – март**

Воз- раст	Сосняк брусничный, III класс бонитета			Сосняк сфагновый, Vб класс бонитета			Ельник черничный, III класс бонитета		
	$m$ , т/га	$E_f$ , мм	$E_f$ / $E_{gr}$	$m$ , т/га	$E_f$ , мм	$E_f$ / $E_{gr}$	$m$ , т/га	$E_f$ , мм	$E_f$ / $E_{gr}$
20	9.55	24	0.98				13.7	25	1.04
30	12.5	25	1.03				22.0	29	1.22
40	13.2	25	1.05				24.7	31	1.30
50	13.1	25	1.05				25.4	32	1.32
60	13.0	25	1.04	1.21	23	0.98	25.5	32	1.32
70	12.6	25	1.04	2.27	23	0.96	25.1	31	1.31
80	12.3	25	1.03	3.04	23	0.96	24.9	31	1.30
90	12.0	25	1.02	3.62	23	0.95	24.2	31	1.28
100	11.7	24	1.02	4.06	23	0.95	23.6	30	1.27
110	11.4	24	1.01	4.40	23	0.95	23.0	30	1.25
120	11.1	24	1.01	4.68	23	0.95	22.6	30	1.24
130	10.9	24	1.0	4.90	23	0.95	22.1	29	1.23
140	10.6	24	1.0	5.08	23	0.95	21.6	29	1.21

Соотношение величин испарения с хвойного леса и поля может быть меньше или больше единицы в зависимости от массы хвои (величины листового индекса) (табл. 4.16, рис. 4.27). Этот фактор изменяется в довольно широких пределах, и наиболее часто встречаемые запасы хвои в северных лесах колеблются от 3–4 до 20–25 т/га. Как следует из данных, приведенных в табл. 4.16 и на рис. 4.27, значения испарения с леса и поля остаются практически равными (расхождения не превышают 5%) при изменении фитомассы в пределах от ее минимальных величин до 12–13 т/га. Такие запасы

хвои характерны для большей части северных сосновых лесов. Следовательно, испарение с соснового леса в зимний период можно принимать таким же, как и с поля. Вместе с тем, расхождения значений испарения с высокопродуктивных еловых древостоев и с поля могут достигать 35–40% (табл. 4.16, рис. 4.27). Величины превышения испарений, определенных расчетным путем, в зависимости от массы хвои оцениваются следующим уравнением:

$$E_f/E_{gr} = 0.75 + 0.15\exp(0.052m). \quad (4.15)$$

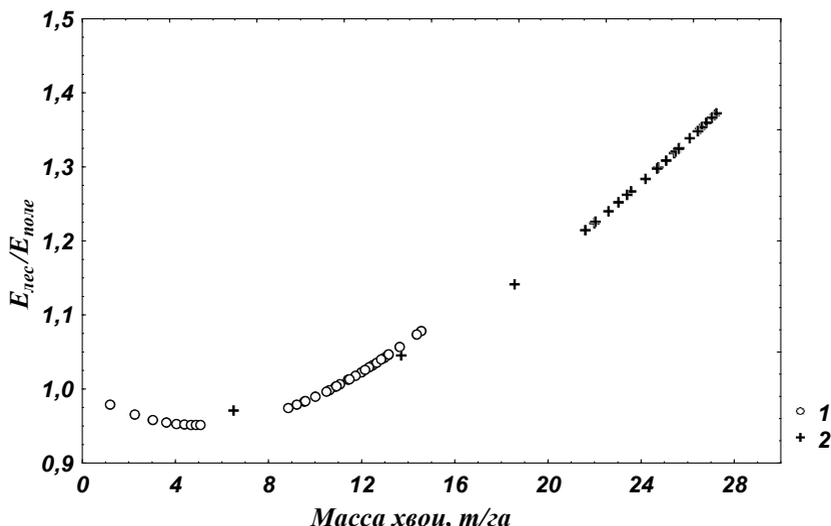


Рис. 4.27. Зависимость соотношений испарения с хвойного леса и поля от массы хвои (1 – сосновый лес, 2 – еловый лес)

Нужно отметить, что полученное С. Ф. Федоровым [194] на основании наблюдений вблизи г. Валдая расхождение между испарением с высокополнотного елового леса и поля составляет 38%. В среднем для хвойного леса при выполнении гидрологических расчетов автор рекомендует вычисленную величину испарения с поля увеличивать в 1.25 раза [160, 194]. По приведенным С. Ф. Федоровым таксационным характеристикам лесных участков, где проводились наблюдения, нами по формуле (1.12) были рассчитаны приближенные запасы хвои, равные в среднем 25 т/га. Для этих условий расхождение между  $E_f$  и  $E_{gr}$ , полученное по (4.15), составляет

30%. Такое соответствие в данном случае можно признать вполне удовлетворительным, что позволяет рекомендовать формулу (4.15), наряду с приведенными в главе 3, для определения испарения с леса.

Таким образом, показанные в работе зависимости соответствуют современным представлениям о протекании процесса испарения со снега. Вместе с тем, полученный вывод о более интенсивном снегонакоплении в лесу по сравнению с полем и в безоттепельные периоды указывает на наличие неучтенных факторов, обуславливающих это расхождение. По-видимому, более высокое снегонакопление в лесах в безоттепельные периоды можно объяснить, с одной стороны, возрастанием испарения снега в поле в период метелевого переноса, на что указывает А. К. Дюнин [60], с другой стороны, – возможным снижением испарения с леса (по сравнению с полем) при уменьшении массы хвои ниже 10 т/га (см. рис. 4.27). Наличие первого фактора подтверждается также зависимостью снегозапасов от величины поляны (см. рис. 4.26), так как наблюдаемое снижение снегозапасов с возрастанием площади открытых участков может объясняться увеличением интенсивности метелевого переноса. Возможность проявления второго фактора объясняется сохраняющимся влиянием даже низкополнотного леса на снижение испарения под его пологом и уменьшением испарения с крон древостоя в связи с уменьшением их площади.

## **5. ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА В ОСУШАЕМЫХ ЛЕСАХ**

На большей части территории Европейского Севера России доля земель, осушаемых для лесного хозяйства, выше, чем для сельскохозяйственного производства. В частности, на юге Карелии (среднетаежная подзона) осушаемые леса занимают более 20% площади некоторых небольших водосборов [3], что может заметно влиять на формирование элементов водного баланса.

Проблема оценки изменения водности рек в результате гидролесомелиорации имеет давнюю историю. При решении этой задачи использовались различные подходы [36, 139, 237, 244, 245]. Значительная часть экспериментальных исследований выполнялась на малых водосборах, что позволяло получить более точную количественную оценку изменения водности изучаемого водотока. Но при этом часто, как и в отношении сельскохозяйственной мелиорации, не учитывались региональные особенности формирования стока малой реки, к основным из которых можно отнести недостаточную врезанность русла и возможность значительного водообмена с соседними водосборами, что делает невозможным распространение полученных результатов на другие водосборы. Большое влияние на условия формирования стока при гидролесомелиорации оказывают процессы, связанные с трансформацией растительного покрова, что часто не учитывалось при оценке влияния этого вида хозяйственной деятельности на сток и при использовании полученных экспериментальным путем выводов на других участках. В определенной степени это объясняет наличие и в настоящее время противоречивых мнений о гидрологической роли гидролесомелиорации.

Неоднозначность имеющихся оценок влияния гидромелиорации на различные характеристики стока и отсутствие строгих моделей, позволяющих прогнозировать динамику стока в постмелиоративный период, свидетельствуют о необходимости продолжения региональных исследований данной проблемы. Эти работы, связанные с изучением влияния условий произрастания леса на водные ресурсы, важны и для понимания особенностей формирования гидрологического режима такой лесной территории, как Европейский Север России.

Большой объем работ по оценке изменения стока в северных регионах под влиянием гидроресомелиорации выполняли в Карелии И. М. Нестеренко и В. А. Чесноков [137, 207], в Финляндии – П. Сеуна [244, 245], Л. Хейкурайнен [228], в Швеции – Л. Лундин [236, 237].

По оценке В. А. Чеснокова, для малых рек характерно увеличение стока после сооружения осушительной сети, что согласуется с результатами многих исследований, проведенных в других регионах [36]. Это можно объяснить увеличением грунтового притока в связи с увеличением густоты и глубины дренажной сети на незамкнутых водосборах и, для начального периода осушения, влиянием перестройки в биоценозе, вызванной изменением водного режима корнеобитаемого слоя почв.

И. М. Нестеренко влияние мелиорации оценивал для сравнительно больших водосборов, включающих в себя осушаемые для сельско- и лесохозяйственного использования участки с разными типами лесов, болот и разными периодами осушения. Им была получена интегральная оценка влияния на сток антропогенной деятельности, которая свидетельствует об общем снижении за 21 год слоя годового стока в бассейне р. Олонки в пределах 10% в течение периода с интенсивным развитием гидромелиоративных работ при некотором увеличении стока в первые 1–2 года после осушения болот [137].

Результатом гидроресомелиорации, отражающимся на водном балансе осушаемых участков, является изменение суммарного испарения и появление дополнительного стока. Изменение испарения с залесенных осушаемых водосборов обусловлено преобразованием продуктивности древостоя, степень и интенсивность которого

зависит от типа и возраста леса до осушения и продолжительности осушения. Выше было отмечено, что в полной мере лесоводственный эффект проявляется после 10-летнего периода осушения. Нужно отметить, что В. М. Медведева [121] отводит на преобразовательный процесс более продолжительный период. Следовательно, объективную оценку гидрологической роли гидролесомелиорации в преобразовании водного баланса для всех типов леса можно получить только при переходе преобразований объекта в стадию динамической стабилизации.

В строительный (воздействия) и в переходный периоды изменение эвапотранспирации можно считать незначительным, так как возможное снижение испарения с наземного покрова из-за преобразования растительности будет в определенной степени компенсироваться ростом транспирации с древостоя. Этот период характеризуется появлением дополнительного стока с осушаемого болота за счет уплотнения и усадки торфяника, а также сработки или накопления торфа. Последние два процесса играют минимальную роль в данные периоды в формировании стока, и их влияние затухает усадкой торфяника. Кроме того, существуют различные мнения о влиянии осушения залесенных болот на сработку и накопление торфа.

Одни исследователи утверждают, что при лесосушении за счет активизации процессов разложения органического вещества и возрастания выноса минеральных веществ вследствие увеличения продуктивности растений происходит сработка торфа [246]. По другим исследованиям, после гидролесомелиорации процесс торфонакопления продолжается, но с замедленной интенсивностью [36]. Некоторые финские и российские ученые считают, что проявление лесосушения в этих процессах зависит от трофности болот: процесс торфонакопления может продолжаться, хотя и с меньшей интенсивностью, на мезотрофных болотах [169, 233], тогда как на олиготрофных будет наблюдаться сработка торфа [169]. Однако, по мнению В. И. Саковца [169], процесс минерализации на бедных болотах интенсивно протекает только в первые годы после осушения.

Несмотря на противоречивость мнений о накоплении и сработке торфа после осушения, можно сделать вывод, что для строительного и переходного периода основные изменения водного

баланса связаны с появлением дополнительного стока, основная доля которого формируется за счет уплотнения и усадки торфяника. Для этого случая уравнение для оценки преобразования стока (2.7') можно представить в следующем виде:

$$dY = f_b(Y_{бр\tau} + Y_{ls}). \quad (5.1)$$

Решение этого уравнения в данной работе выполнено по материалам, полученным на территории Карелии. Сложность получения значений дополнительного стока при уплотнении, осадке и сработке торфяника связана с тем, что наблюдений за динамикой водно-физических свойств и понижением поверхности болота при гидролесомелиорации очень мало.

Имеющиеся разовые определения понижения поверхности осушаемого болота за счет уплотнения, усадки и сработки торфяника, выполненные В. И. Саковцом [169] на участках с 20-летним периодом осушения, позволили получить ориентировочную интегральную величину дополнительного стока. Сток из осушаемого слоя торфяника определялся как разность между величинами влагозапасов в этом слое до осушения и после снижения УПГВ (2.9). Запасы влаги рассчитывались по (2.10) и (2.11), значение полной влагоемкости вычислялось по данным наблюдений, приведенных в [169]. Понижение УПГВ после сооружения осушительной сети принималось равным 30 см [121, 144]. Сток из слоя осадки и сработки рассчитывался по (2.13). Данные о понижении поверхности торфяника брались из [169], а влажность слоя принималась равной полной влагоемкости. Необходимая для расчета информация и результаты вычислений приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Дополнительный сток при гидролесомелиорации с различных типов леса за 20-летний период осушения в Карелии**

Характеристика	Сосняк травяно-сфагновый		Сосняк куст.-сфагновый	
	неосушенный	осушенный	неосушенный	осушенный
Мощность торфа, м	1.5–1.7		2.5–2.9	
Полная влагоемкость	0.94	0.92	0.96	0.95
Сток из осушаемого слоя, мм	0	11	0	8
Суммарная осадка торфа, м	0	0.24	0	0.26
Сток из слоя осадки, мм	0	226	0	250
Суммарный сток, мм	0	237	0	258

Полученные значения дополнительного стока при гидролесомелиорации в два раза меньше, чем после осушения для целей сельского хозяйства. Интегральная величина стока с торфяника, используемого в течение такого же периода (20 лет) для выращивания многолетних трав, составляет 450–500 мм [89]. Это различие обусловлено в первую очередь тем, что при сельскохозяйственном использовании болот требуется более глубокое их осушение, чем для лесовыращивания.

По исследованиям в Финляндии, при осушении торфяника (мощность торфа до осушения 1.5 м) для лесного хозяйства каналами глубиной 60 см с расстояниями между ними около 35 м величина дополнительного стока за 9-летний период из слоя осадки составила 120 мм и из осушаемого слоя – 50 мм [245]. Расхождения полученных значений дополнительного стока в Карелии и в Финляндии объясняются как субъективными (различные способы вычислений), так и объективными (различия природных условий, способов и продолжительности осушения) факторами.

Величина сброса грунтовых вод со смежной с осушаемым для лесного хозяйства участком территории определялась также с использованием метода, описанного в главе 2. Ширину зоны влияния принимали по рекомендации В. Ф. Шебеко [211], равной 2 км, а установившееся здесь положение УГВ рассчитывали по формулам (2.15), (2.16) и (2.18). Продолжительность периода, необходимого для стабилизации УГВ, принимали равной трем годам, а значения коэффициентов фильтрации и водоотдачи – 10 м/сут и 0.2. Глубина осушительной сети при гидролесомелиорации редко превышает 1 м, кроме того, на исследуемых участках мощность торфа составляет около 2 м. Поэтому понижение УГВ в створе ловчего канала (2.15) и мощность грунтового потока в формуле (2.18) в наших расчетах приняты равными соответственно 1 и 2 м. При этих исходных значениях была получена средняя величина сработки УГВ в зоне влияния осушаемого участка, равная 0.16 м, что соответствует 32 мм слоя стока (2.14). Данное значение также почти в 2 раза меньше, чем при сельскохозяйственной мелиорации.

Средняя интегральная величина дополнительного стока, которая рассчитана по параметрам, полученным для осушаемых в течение 20 лет объектов, составила около 248 мм (см. табл. 5.1). При

этом основная часть стока образована за счет понижения поверхности торфяника, вызванного уплотнением торфа. Поскольку интенсивный рост плотности торфяника, как это наблюдается при осушении для сельскохозяйственных целей, длится 3–5 лет [88], т. е. все основания принять, что практически весь этот объем воды стечет в первые 5 лет, тем более что и интенсивная сработка торфяника, по мнению В. И. Саковца [169], происходит в первые годы осушения. Следовательно, исходя из изложенного выше, можно сделать вывод, что увеличение площади осушаемых земель на 10% сопровождается в течение первых 5 лет ростом годового стока в среднем на 5–6 мм.

В период динамической стабилизации преобразование водного баланса осушаемой территории связано с изменением продуктивности леса и, как следствие этого, суммарного испарения. Роль сработки и накопления торфа в формировании водного баланса очень незначительная, тем более что интенсификация этих процессов на некоторых болотах наблюдается только в первые годы осушения [169]. Появление заметной величины дополнительного стока возможно, как это наблюдается при сельскохозяйственной мелиорации [89], после ремонта или реконструкции осушительной сети, а эти работы в лесу не проводятся. Преобразования растительности в связи с мелиорацией практически завершаются спустя 50–60 лет после начала осушения [121], однако ее влияние на изменение водного баланса с достаточной степенью точности можно оценить через 10 лет после завершения мелиоративных работ. Для этой цели исходное уравнение (2.7) представляется в следующем виде:

$$dY = f_b dE. \quad (5.2)$$

Оценка изменения испарения для осушаемых в среднем в течение 20 лет лесов была выполнена по таксационным характеристикам, полученным в основном на территории Карелии (табл. 5.2). При такой продолжительности осушения фактор времени, как это показано выше, уже не является определяющим в изменении таксационных характеристик. Расчеты выполнялись для всех типов леса, занимающих наибольшие площади среди осушаемых. Вычисления изменений составных частей суммарного испарения выполнялись для каждого типа леса для одного и того же возраста как до, так и после осушения. Таксационные характеристики

осушенных лесов брались из опубликованных источников [10, 11, 120, 121], кроме того, использовались неопубликованные данные Института леса [90]. Характеристики для лесов до мелиорации брались также из публикаций, но возрастные изменения, которые произошли бы и в их естественном состоянии за период, равный продолжительности осушения, корректировались по таблицам М. М. Орлова [108]. Изменение суммарного испарения оценивалось по (5.2), а его составные части определялись по приведенным в главе 3 формулам.

Таблица 5.2

**Изменение испарения и стока под влиянием гидролесомелиорации**

Тип леса	Возраст, лет	Период осушения, лет	$dE_r$ , мм	$dE_i$ , мм	$dE_s$ , мм	$dY$ , мм
Сосняк травяно-сфагновый	120	40	-84	-49	48	-85
- " -	110	20	-37	-14	17	-34
- " -	105	20	-120	-50	96	-74
Сосняк осоково-сфагновый	115	20	-44	-13	14	-43
Сосняк кустарничково-сфагновый	110	20	-19	-27	34	-12
	Среднее		-61	-31	42	-50
Ельник травяно-сфагновый	91	25	-24	-23	13	-34
То же	111	45	-30	-27	17	-40
“	120	25	-54	-56	29	-81
“	140	45	-36	-23	13	-46
“	176	10	2	1	-1	2
“	95	25	-15	-14	13	-16
“	125	45	-72	-65	55	-82
	Среднее	31	-33	-30	20	-43

В подавляющем большинстве случаев отмечается увеличение транспирации древостоя и испарения задержанных кронами осадков. Это объясняется более интенсивным приростом всей фитомассы, включающей в себя и ассимилирующий аппарат, на осушаемых землях.

Изменение радиационного, теплового и водного режимов под пологом леса сопровождается сменой видового состава наземной

растительности и уменьшением суммарного испарения наземным покровом. Однако это полностью не компенсирует возросшего расхода влаги, и суммарным эффектом преобразований чаще всего является увеличение испарения и снижение стока с осушаемых лесов.

Изменение испарения зависит в первую очередь от влияния таких факторов, как возраст леса и продуктивность болот. Незначительное увеличение и даже снижение суммарного испарения отмечается в низкопродуктивных (сосняк кустарничково-сфагновый) и старых (ельник травяно-сфагновый в возрасте 176 лет) лесах. Существенное увеличение испарения наблюдается при сочетании продолжительного периода осушения, продуктивного возраста древостоя и лучших лесорастительных условий.

В табл. 5.2 представлен достаточно широкий спектр основных возрастных категорий и типов осушаемых лесов, различными сочетаниями которых определяются эффективность осушения и вариация изменения элементов водного баланса. Поэтому усредненная величина полученных значений изменений испарения и стока (46 мм) является оценкой гидрологической роли гидролесомелиорации переувлажненных лесов в целом для Карелии.

В результате осушения большая часть безлесных болот покрывается древесной растительностью. Достаточно часто это происходит естественным путем, в отдельных случаях проводятся работы по искусственному лесовосстановлению. В работе [121] приведены таксационные характеристики возникших на безлесных и слабооблесенных болотах среднетаежной подзоны Карелии насаждений. Наличие этой информации позволило определить суммарное испарение с этих осушаемых болот по методу Крестовского. Результаты расчета и некоторые характеристики древостоя приведены в табл. 5.3.

Начальные величины испарения с болот были рассчитаны по методу В. В. Романова [160]. Для широты Петрозаводска рассчитанное испарение с верхового болота составило 459 мм, с низинного – 456 мм. По наблюдениям на Корзинском мелиоративном стационаре (70 км к с.-з. от Петрозаводска) [138] с переходного болота за год испаряется 441 мм. Учитывая существующую точность расчетов и измерений, можно, по-видимому, величину испарения с естественного болота для района Петрозаводска принять, равную 450 мм.

Таблица 5.3

**Характеристика возникших на осушаемых болотах насаждений  
и испарение с них**

Состав	Период осушения, лет	Возраст древостоя, лет	Бонитет	Запас древесины, м <sup>3</sup> /га	Испарение, мм	Изменение стока, мм
Низинное болото						
3С7Б	27	25	I.0	80	418	32
10Б	50	38	I.0	230	498	-48
3.3С6.7Б	41	40	I.3	213	531	-81
3.3С6.6Б0.1Ос	51	50	I.1	287	563	-113
8.0С2.0Б	55	50	I.8	365	616	-166
9.2С0.8Б	55	50	III.0	241	535	-85
Среднее	46	42	I.5	236	527	-77
Переходное болото						
7.7С2.3Б	16	15	III.4	20	413	37
8.4С1.6Б	16	15	IV.0	19	410	40
8.0С2.0Б	30	26	III.2	146	579	-129
3.5С0.8Е5.7Б	50	39	I.4	171	537	-87
6.6С1.1Е2.3Б	71	65	I.7	253	512	-62
Среднее	37	32	II.7	122	490	-40
Верховое болото						
9.0С1.0Б	20	14	IV.0	10	398	52
4.0С6.0Б	25	20	III.3	40	423	27
5.2С4.8Б	50	45	III.1	156	518	-68
8.3С1.7Б	50	39	II.0	143	462	-12
9.6С0.4Б	50	39	II.8	59	405	45
9.9С0.1Б	50	48	III.2	155	456	-6
10С	50	48	IV.2	77	412	38
Среднее	42	36	III.2	91	439	11

Первыми на осушаемых болотах поселяются сосны и березы. Под влиянием естественных процессов и рубок ухода доминирующее положение постепенно занимают в большинстве случаев хвойные породы. Протекающие процессы в почвогрунтах и смена видового состава древостоя находят отражение и в водном балансе осушаемых участков. Приведенные в табл. 5.3 величины достаточно ярко свидетельствуют о влиянии продолжительности осушения и продуктивности осушаемого болота на изменение испарения и стока. Ощутимые снижения стока можно наблюдать после проведения мелиоративных работ на низинном болоте. При отсутствии

на нем древостоя до осушения наибольшего гидрологического эффекта следует ожидать через 50–60 лет. Судя по классу бонитета, повышается продуктивность и верхового болота, однако, изменения испарения и стока здесь минимальные, и в среднем сток даже незначительно возрастает.

В целом следует признать, что гидроресомелиорация на территории ЕСП привела к некоторому снижению стока. В грубом приближении, усредняя все полученные оценки (см. табл. 5.2, 5.3), величину снижения стока в Карелии можно принять равной 40 мм. Учитывая общую площадь осушенных болот и заболоченных лесов, снижение объема водных ресурсов Карелии в результате гидроресомелиорации составляет на  $0.26 \text{ км}^3$ . Относительное уменьшение водных ресурсов Карелии, вызванное этим видом хозяйственной деятельности, составляет менее 2%.

Основные массивы осушенных земель расположены в бассейнах Онежского и Ладожского озер, поэтому здесь наблюдается большее относительное снижение стока. Наиболее значительным оно может быть на некоторых водосборах с высокой долей осушенных земель. Об этом свидетельствуют результаты выполненных интегральных оценок антропогенной деятельности, включающей и гидроресомелиорацию. В 70–80-е годы, когда уже был выполнен большой объем мелиоративных работ, сток отдельных рек снизился почти на 10% [88, 137].

Полученные здесь выводы о гидрологической роли гидроресомелиорации подтверждаются результатами анализа влияния условий произрастания древостоев на элементы водного баланса, представленного в главе 4. Эти выводы согласуются с итогами исследований Б. В. Бабикова в Ленинградской области [14], который отмечал значительное увеличение транспирации и снижения стока до 55% при интенсивном осушении лесного болота вследствие улучшения роста леса.

Вместе с тем существует мнение [36], что осушение как верховых, так и низинных болот приводит к снижению суммарного испарения и, следовательно, к увеличению годового стока. Однако такое проявление гидроресомелиорации, по нашему мнению, может наблюдаться, как правило, при осушении перестойных лесов или в начальный период освоения болот.

Особенностью проведения гидролесомелиорации как в Швеции, так и в Финляндии является полное удаление древостоя с участков до их осушения. При этом происходит увеличение среднегодового стока, и величина изменения зависит от запаса древесины. По оценкам С. Е. Мустонена [245], вырубка 10 м<sup>3</sup>/га приводит к росту годового стока в среднем на 7.7 мм. Увеличение стока в начальный период на большинстве исследуемых безлесных водосборов отмечают и после сооружения осушительной сети [236, 237, 244, 245]. Отсутствие изменений на одном из водосборов в Финляндии П. Сеуна объясняет наличием на нем локальных особенностей (фильтрационной зоны) [244]. Рост стока объясняется уменьшением испарения из-за иссушения верхнего слоя почвогрунтов, что приводит к изменению стока на 29% и появлением дополнительного стока на торфяниках вследствие снижения УПГВ и вызываемых этим осадки поверхности и уплотнения торфа. В среднем, по оценке П. Сеуны, увеличение стока в результате действия всех факторов в первые 9 лет после начала осушения составляет 43% по отношению к естественным условиям. Однако разница с течением времени уменьшается, и через 15–20 лет преобразований величина стока достигает естественного уровня [245]. По оценкам Л. Лундина [237], уменьшение стока с торфяников наблюдается уже после 10 лет осушения. Такой же режим преобразования стока со временем характерен и при осушении минеральных земель [237].

Приведенный выше анализ публикаций по влиянию гидролесомелиорации на сток свидетельствует о соответствии полученной нами для территории Карелии методом водного баланса оценки результатам исследований в других регионах с использованием в основном метода контрольных водосборов. При этом следует отметить, что использование последнего на небольших водосборах из-за наличия аazonальных факторов может привести к неверным результатам, что было отмечено и П. Сеуной [245].

## **6. СТОК С ВОДОСБОРОВ, ПОКРЫТЫХ ПРОИЗВОДНЫМИ (ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМИ) ЛЕСАМИ**

Наиболее важный с хозяйственной точки зрения элемент водного баланса – годовой сток. Его величина, сформированная в рамках административных границ региона, характеризует водные ресурсы этой территории. Сток с водосбора представляет собой продукт трансформации на его площади атмосферных осадков и солнечной энергии. Наличие разнообразной по особенностям трансформации осадков и энергии растительности на различных частях водосбора обуславливает сложность в оценке влияния на сток преобразования или смены ее отдельных видов под воздействием антропогенного или природного фактора.

Так, в ходе эксплуатации лесного фонда на достаточно крупном (относительно площади ежегодных рубок) водосборе создается мозаичная картина, составленная из уже облесенных и еще не облесенных вырубок различного возраста. Вклад этих участков в результирующую величину стока в отдельных случаях может различаться более чем на 50–60%. Иллюстрацией этих цифр могут служить рис. 2.1 и 4.4–4.6, где показана возрастная динамика испарения с вырубок и растущего леса. В монографии О. И. Крестовского [98] в качестве примера приведена графическая модель возрастной структуры лесного массива, состоящая из 100 участков. Получить полную информацию о количестве участков разновозрастного леса и вырубок, о распределении их по возрасту (особенно это касается необлесенных вырубок) в настоящее время очень сложно. Для этого необходимо собрать и проанализировать данные о распределении лесного фонда по категориям земель, о распределении насаж-

дений по классам бонитета и возраста за период облесения вырубок, который может длиться 10–15 лет.

Вместе с тем, при всем многообразии различающихся по возрасту вырубок на крупном водосборе при устойчивом лесопользовании их соотношение мало меняется от года к году. При таком положении, когда объем вырубаемого древостоя и площадь создаваемых при этом новых вырубок на водосборе практически не меняются, степень варьирования стока в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека. Независимость стока от этого фактора возможна для тех водосборов, площадь эксплуатируемого лесного фонда на которых превышает площадь ежегодных рубок в 100 раз. Эта величина получена из простых рассуждений, основанных на том, что полный цикл роста леса от рубки до рубки составляет примерно 100 лет. Следовательно, ежегодные рубки не приводят к изменению общего количества одновозрастного древостоя, и его средний возраст на водосборе остается постоянным. Определяющее влияние на годовую изменчивость стока в подобных случаях оказывают метеорологические и климатические условия. Очевидно, что максимальное проявление лесозаготовок в величине стока будет на тех водосборах, площадь которых соответствует размерам ежегодно создаваемых вырубок.

Конечно, устойчивость распределения лесного фонда по классам возраста вовсе не означает, что при этом не меняется вид распределения по классам бонитета, так как вырубаемые от года к году участки будут отличаться по продуктивности древостоя. Однако следует учитывать, что основным фактором, определяющим средний класс бонитета крупного лесного массива, являются климатические условия и, в частности, температура воздуха. Поэтому при возможных незначительных колебаниях продуктивности лесного массива из-за ежегодных рубок разнобонитетных участков усредненное за ряд лет значение класса бонитета остается постоянным. Кроме того, колебания продуктивности массива, по-видимому, происходят в очень узком интервале еще и вследствие того, что наибольшим спросом у лесозаготовителей пользуются высокопродуктивные леса. Благодаря всему вышеуказанному можно с уверенностью утверждать, что существенных изменений условий формирования стока при нарушении распределения классов бонитета ожидать не приходится.

При увеличении или уменьшении общего объема лесопользования на водосборе происходит изменение возрастной структуры лесного фонда и, соответственно, уменьшается или увеличивается средний возраст древостоя. В частности, значительным превышением объема вырубаемой древесины над расчетной лесосекой в 60-е годы можно объяснить снижение среднего возраста лесов Карелии со 119 лет в 1960 году до 79 лет в 1997 году. Возраст древостоя является одним из значительных факторов, влияющих на расход воды древостоем и на суммарное испарение с леса (раздел 4.1.1.). На рис. 6.1 показано влияние на сток среднего возраста сосны, которая занимает большую часть лесопокрытой площади водосборов. Данная зависимость была получена для тех водосборов Карелии, для которых имелись таксационные характеристики произрастающего на них древостоя.

Приведенная на рис. 6.1 зависимость вполне согласуется со сделанными ранее выводами. В табл. 4.4 показано, что наиболее ощутимое снижение стока по сравнению со среднерайонной величиной отмечается при преобладании на водосборе древостоя VI класса возраста (для сосны и ели этот класс соответствует 101–120 годам). Сосняки Карелии этого возраста наиболее распространенных здесь типов леса характеризуются максимальным количеством хвои и, следовательно, максимальным водопотреблением, что определяет пониженный сток с участков, занятых данным древостоем.

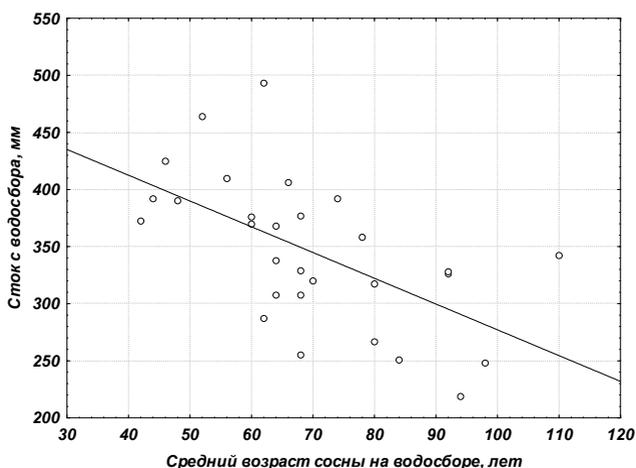


Рис. 6.1. Зависимость стока от среднего возраста сосны на водосборе

Резкое сокращение объема рубок в 90-е годы в Карелии должно привести к увеличению среднего возраста древостоя, что, несомненно, отразится и на стоке. Выполненное моделирование стока с залесенной территории при разных объемах заготавливаемой древесины и разных сценариях проведения рубок свидетельствует о заметном влиянии этих факторов на сток (рис. 6.2).

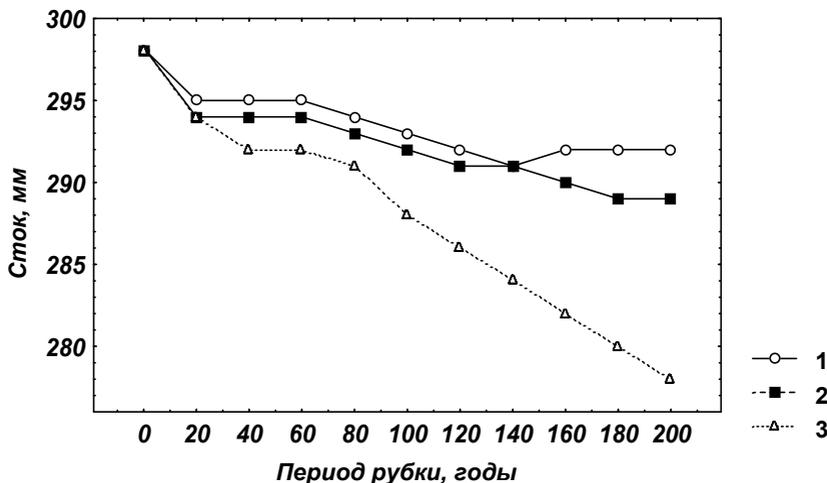


Рис. 6.2. Сток с модельного водосбора: 1 – вырубка леса III–V бонитета в размере расчетной лесосеки, 2 – вырубка леса всех бонитетов в размере расчетной лесосеки, 3 – то же при использовании лесосеки на 66% [17]

На рис. 6.2 показана прогнозируемая динамика стока на 200-летний период при разных сценариях лесопользования. Во всех случаях предполагалось, что вырубается древостой старше VII класса возраста. Испарение с модельного водосбора для каждого 20-летнего периода определялось по методу Крестовского, испарение со свежей вырубki – по формуле (3.76). Сток с водосбора за гидрологический год определялся по методу водного баланса:

$$Y = P - E, \quad (6.1)$$

где  $P$  – осадки с поправками на смачивание и ветровой недоучет, мм;  $E$  – испарение с леса, мм.

Для постоянных в течение длительного периода условий эксплуатации лесного фонда колебания стока за весь расчетный срок составляют всего 2–3%. Эти небольшие изменения вызваны более

интенсивной эксплуатацией леса в предшествующие годы и ограничениями при выборе расчетной лесосеки (в первом случае для рубок отводился древостой III–V классов бонитета, во втором случае вырубался лес всех бонитетов). При уменьшении объема ежегодно вырубаемой древесины до 66% от расчетной лесосеки (что наблюдалось в Карелии в последние годы) произойдет наибольшее снижение стока (до 7%) за счет преобразований возрастной структуры леса.

Можно полагать, что некоторые изменения величины лесопокрытой площади и преобразования возрастной структуры лесного фонда происходили и происходят в течение всего периода лесозексплуатации. О динамике состояния лесного фонда Карелии за период с 1956 по 2003 год можно судить по информации, приведенной в таблицах 6.1 и 6.2. Данные взяты из работы В. И. Саковца и А. А. Иванчикова [170].

Таблица 6.1

**Динамика состояния лесного фонда Карелии (в числителе площадь, тыс. га, в знаменателе удельный запас древесины, м<sup>3</sup>/га)**

Возраст, лет	Годы учета							
	1956	1966	1973	1978	1983	1993	1998	2003
Молодняки, 1–40	<u>960.6</u> 19	<u>1309.05</u> 21	<u>1953.0</u> 21	<u>2564.4</u> 21	<u>3287.5</u> 19	<u>3486.3</u> 26	<u>3523.2</u> 32	<u>3625.6</u> 33
Средневозрастные, 41–80	<u>1169.3</u> 106	<u>1438.1</u> 115	<u>1694.0</u> 114	<u>1652.4</u> 112	<u>1767.3</u> 123	<u>1906.1</u> 118	<u>2040.9</u> 118	<u>2176.1</u> 121
Приспевающие, 81–100	<u>691.0</u> 152	<u>648.1</u> 174	<u>614.6</u> 174	<u>628.0</u> 167	<u>589.3</u> 151	<u>655.2</u> 168	<u>721.6</u> 180	<u>652.7</u> 184
Спелые и перестойные, более 101	<u>5531.8</u> 140	<u>4436.8</u> 135	<u>4002.4</u> 132	<u>3495.5</u> 134	<u>3172.2</u> 130	<u>2883.0</u> 140	<u>2980.2</u> 146	<u>2774.0</u> 147
Итого	<u>8352.7</u> 122	<u>7832.5</u> 116	<u>8264.0</u> 105	<u>8340.3</u> 97	<u>8816.3</u> 89	<u>8930.6</u> 93	<u>9265.9</u> 99	<u>9232.9</u> 99
Лесистость, %	53	50	53	53	56	57	59	59

Изменения, происходящие с лесистостью, с возрастной структурой и запасами древесины, непосредственно, связаны с деятельностью человека в лесу. Минимум лесопокрытой площади приходится на 60-е годы – период после интенсификации лесозаготовительных работ. Облесение осушаемых болот и снижение объема заготовок древесины в 70–80-е годы, которое с 90-х годов носит

катастрофический характер, сопровождалось ростом покрытой лесом площади [170]. Несомненно, существенное увеличение площади молодняка (в 4 раза за рассматриваемый период) и снижение в 2 раза площади, занятой спелым и перестойным древостоем, объясняется достаточно высоким уровнем заготовок древесины по сравнению с военным и довоенным периодами. Интенсивность лесозаготовок, а также проведение рубок промежуточного пользования (рубок ухода) отражается также и на запасе древесины (см. табл. 6.1).

Таблица 6.2

**Распределение покрытой лесом площади РК по преобладающим породам в различные годы, % [170]**

Преобладающая порода	1932	1978	1998
Сосна	68.6	58.9	63.8
Ель	27.3	27.9	25.1
Лиственницы	4.1	13.2	11.1

Наименьшей доля лиственных пород была в годы, которым предшествовали периоды со сравнительно низкими объемами лесозаготовок (до первой половины XX века). Увеличение доли лиственных и снижение хвойных пород в конце 70-х годов XX века обусловлено стремительным ростом объемом лесозаготовок в 50–60-е годы (см. табл. 6.2) [170].

Данные о распределении лесного фонда Карелии по породам и по возрастным категориям, представленные в [170], позволяют рассчитать испарение и сток для каждого года проведения таксации. Антропогенная составляющая стока определялась дифференцированно с учетом вклада каждой породы как разницы величин фактического стока со всей лесопокрытой части лесного фонда и стока, который бы сформировался при условии, что данная площадь была бы покрыта коренным лесом. Использованное для определения этой величины выражение основано на уравнении водного баланса и имеет следующий вид:

$$W_{an} = -\sum \sum (F_{for i \tau} E_{i \tau}) / 10^8 + F_{for} E_{mat} / 10^8, \quad (6.2)$$

где  $W_{an}$  – антропогенная составляющая стока с лесопокрытой площади, км<sup>3</sup>;  $F_{for i \tau}$  – площадь лесного фонда, занятая  $i$ -той породой древостоя возраста  $\tau$ , га;  $F_{for}$  – лесопокрытая площадь лесного фонда, га;

$E_{i\tau}$  – испарение с площади лесного фонда, занятой  $i$ -той породой древостоя возраста  $\tau$ , мм;  $E_{mat}$  – средневзвешенное испарение со спелого и перестойного елового и соснового древостоя, мм.

Уравнение (6.2) позволяет получить как абсолютную оценку (разница между стоком с растущего леса и стоком с коренного леса), так и относительную оценку (разница между стоком с растущего леса и стоком со спелого леса перед рубкой) [84] изменения стока после рубок. Такое утверждение основывается на том, что в соответствии с ранее сделанными выводами испарение с перестойного и спелого леса практически равно испарению с коренного леса [19, 84]. Поскольку основная часть тайги представлена хвойными породами, а появление лиственных пород связано в большой степени с деятельностью человека, о чем свидетельствует увеличение их доли с ростом объемов заготовки древесины (см. табл. 6.2), то в данной работе при расчете испарения с коренных лесов использовались только сосняки и ельники. В качестве расчетного принималось средневзвешенное испарение с учетом площади, занимаемой каждой из этих пород.

Для исключения влияния погодных условий значения испарения и стока рассчитывались с использованием средних для Карелии метеорологических характеристик. В этом случае полученные колебания речного стока обусловлены влиянием только изменения состояния лесного фонда.

Суммарное испарение с лесопокрытой части территории Карелии рассчитывалось по методу Крестовского с использованием предложенных нами дополнений и уточнений (глава 3).

Представление величины антропогенной составляющей стока в мм слоя, выполнялось с использованием соотношения:

$$Y_{an} = 10^8 W_{an}/F_{for}. \quad (6.3)$$

Нужно отметить, что точность результатов вычислений ограничивалась, даже в пределах используемых методов расчета, степенью детализации данных о состоянии лесного фонда. Получить более подробную информацию о распределении лесопокрытой территории по возрасту древостоя в настоящее время не представляется возможным. Однако в целом динамика испарения и стока соответствует происходящим изменениям в лесном фонде (табл. 6.3).

## Динамика антропогенной составляющей стока

Год	км <sup>3</sup>	мм
1956	-0.40	-5
1966	-0.89	-11
1973	-1.08	-13
1978	-0.87	-10
1983	-0.99	-11
1993	-1.07	-12
1998	-1.36	-15
2003	-1.52	-16
Среднее	-1.02	-12

Испарение с достаточно большой территории производного (эксплуатируемого) леса выше, чем с коренного. Это обусловлено тем, что в коренных еловых и сосновых лесах перестойный древостой (более 120 лет) составляет основной запас древесины и по площади он покрывает больше половины всей территории [4, 34]. В то же время, наибольшее количество влаги лес расходует в периоды роста, характеризуемые большими запасами фитомассы и высоким ее приростом. Возраст древостоя, в котором наблюдается максимальное испарение, зависит от его породного состава, условий произрастания, динамики запаса древесины, поэтому в целом для лесной зоны и даже для конкретной территории он меняется в широких пределах. Для Карелии диапазон этого возраста захватывает средневозрастной, приспевающий и даже спелый древостой и простирается от 50–60 до 110–120 лет, хотя для большей части произрастающего здесь древостоя он изменяется примерно от 70–80 до 110 лет (табл. 4.1–4.3, рис. 4.4–4.6).

Наименьшее изменение стока с леса соответствует тому состоянию лесного фонда, которое было в 1956 году (см. табл. 6.3). Это объясняется довольно ограниченными последствиями деятельности человека в лесу в предшествующие периоды.

Увеличение объема лесозаготовительных работ в 60–70-е годы привели к более интенсивному снижению стока в последующие годы. Это обусловлено, по-видимому, в первую очередь, ростом площади и запасов средневозрастных лесов, испарение с которых близко или равно максимальному за период роста древостоя.

Кроме того, немалую роль играет и тот факт, что после рубок елового древостоя большая часть вырубок в первые 10–15 лет зарастает лиственным древостоем, главным образом березняком. Он растет в два раза быстрее хвойного, поэтому на таких вырубках уже спустя 30–50 лет после рубок испарение достигает максимальных величин.

В течение рассматриваемого периода величина антропогенной составляющей слоя стока с лесопокрытой площади менялась от 5 до 16 мм (см. табл. 6.3). Однако следует понимать, что вследствие различий в интенсивности лесозаготовок приведенные величины существенно варьируют как в большую, так и в меньшую сторону по территории. На конкретных участках сток после рубок понижается более чем на 100 мм. Кроме того, местами полученные величины реальной антропогенной составляющей стока (см. табл. 6.3) корректировались процессами, вызванными мелиоративными работами, которые наиболее интенсивно проводились в 70–80-е годы.

В табл. 6.3 приводится оценка вклада лесозаготовок в величину стока с лесопокрытой территории, составляющей около 60% площади Карелии (без учета площадей Белого моря, Онежского и Ладожского озер). Выполненные приближенные расчеты позволяют сделать вывод, что лесопромышленная деятельность в Карелии может привести к снижению стока на величину, соответствующую стоку реки со средней площадью водосбора более 5000 км<sup>2</sup>, и это составляет около 3% от всей величины сформировавшегося на территории Карелии стока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Около половины территории ЕСР покрыто таежными лесами, что создает условия и является причиной широкого развития здесь лесопромышленной и лесохозяйственной деятельности. Средоформирующими являются сосняки, ельники и березняки, причем площадь, занятая березняками, даже вместе с другими лиственными породами составляет в среднем около 10% лесного фонда.

К наиболее развитым здесь видам хозяйственной деятельности, влияющим на формирование водного баланса, относятся рубки главного пользования, рубки ухода и гидролесомелиорация. При проведении рубок главного пользования с лесного участка полностью вырубается древостой, что долгие годы, в течение которых лес восстанавливается, отражается на формировании элементов водного баланса. Результатом гидролесомелиорации является рост продуктивности древостоя, при этом изменения в растительном покрове растягиваются на десятилетия. К наименее эффективным факторам, с точки зрения гидрологических оценок, относятся рубки ухода: их влияние на испарение и сток может быть заметно на водосборе, площадь которого соизмерима с размером лесосеки.

В зависимости от состава растений и возрастной структуры деревьев леса таежной зоны делят на коренные и производные. Коренные леса характеризуются стабильной возрастной структурой, благодаря чему в них поддерживаются устойчивые условия формирования элементов водного баланса. Особенность производных лесов, большая часть которых относится к постоянно эксплуатируемым, заключается в значительной изменчивости площадей,

занятых лесами, различающимися по породному составу и возрасту. Это определяет как пространственные, так и временные вариации элементов водного баланса.

К основным факторам, определяющим особенности формирования элементов водного баланса в лесу, относятся состояние и видовое разнообразие растительности наземного покрова, породный состав древостоя, его возраст, условия произрастания и продуктивность. При выделении однородных по условиям формирования элементов водного баланса участков следует применять существующую в лесоведении классификацию лесов по их типам, в которой в качестве критериев используются указанные факторы.

Для удобства моделирования элементов водного баланса формализованы существующие и предложенные в данной работе зависимости для расчета таксационных и биометрических характеристик древостоя (средней высоты древостоя, запаса стволовой древесины, прироста запаса древесины, массы листвы (хвои) и листового индекса).

Предложены методы оценки изменения элементов водного баланса под влиянием рубок главного пользования, рубок ухода и гидролесомелиорации для таежной зоны ЕСР. Оценки, характеризующие изменение элементов водного баланса после рубок в производном лесу, предлагается принимать как относительные, после рубок в коренном лесу – как абсолютные.

Усовершенствованы и обоснованы методы расчета составных частей суммарного испарения с леса по биометрическим характеристикам древостоя, которые в наибольшей степени подвержены преобразованиям в результате хозяйственной деятельности.

Исследована динамика составных частей суммарного испарения с эксплуатируемого леса в различных лесорастительных условиях. Максимальное испарение с леса в зависимости от условий его роста в среднем наблюдается в возрасте от 70 до 120 лет в хвойном и от 50 до 80 лет – в лиственном древостое. Отмечено снижение суммарного испарения и транспирации и смещение их максимальных за период роста леса величин в сторону старшего возраста с ухудшением продуктивности леса. Ухудшение условий роста древостоя на I класс бонитета в лесах, где древостои каждого класса бонитета равномерно распределены по возрастным кате-

гориям, сопровождается снижением суммарного испарения в среднем на 10–30 мм. В общем случае бонитетный градиент испарения может быть выше.

В условиях среднетаежной подзоны рост испарения и понижение стока в сравнении со среднерайонными значениями отмечается при увеличении площади хвойных и лиственных насаждений IV–VIII классов возраста (70–150 лет для хвойных и 35–75 лет для лиственных насаждений), а наиболее ощутимое влияние оказывает лес VI класса возраста.

Суммарное испарение с одинакового по продуктивности и по полноте древостоя мало зависит от его породного состава. Вместе с тем транспирация березняка на 35–40% выше, чем хвойных пород. Заметное снижение суммарного испарения происходит при уменьшении полноты древостоя.

Продуктивность древостоя зависит от климатических факторов, основным фактором, определяющим вариацию классов бонитета однотипных лесов, является температура воздуха. С использованием предложенного в работе метода получена оценка изменения продуктивности древостоя и испарения с леса при возможных долгопериодных колебаниях среднегодовой температуры воздуха. Для условий приращения среднегодовой температуры воздуха в пределах от  $-1$  до  $+2$  °C изменение испарения в большинстве случаев находится в пределах 10%.

Рубки ухода приводят к снижению испарения с леса. В среднем испарение в сосняке уменьшается на 6–7%, а в ельнике – на 12–13%. Самые значительные изменения водного баланса после рубок ухода происходят в высокопродуктивных лесах, возраст которых соответствует максимальному приросту древесины. Такие леса характеризуются наиболее высоким влагопотреблением. Установлены тесные корреляционные зависимости между изменением испарения и суммарным испарением с хвойного леса до рубок. Эти зависимости могут быть использованы для прогноза преобразования влагооборота леса в результате рубок ухода.

При одинаковых условиях произрастания и продуктивности древостоя большого различия в суммарном испарении с коренного и спелого производного леса нет. Если в качестве исходной величины для получения относительной оценки принято испарение с

производного леса 100-летнего возраста, то расхождения между абсолютной и относительной оценкой в течение всего периода роста леса не превышают 10 мм.

Для района исследований построены карты испарения с 20, 40, 60, 80 и 100-летних сосняков, ельников и березняков для II–V классов бонитета. Испарение с молодых лесов средней и южной подзон тайги (20–40 лет), полученное с вновь построенных карт, ниже на 25–30% (особенно низкопродуктивных лесов V класса бонитета), чем снятое с карты Ю. Л. Раунера. С увеличением возраста и продуктивности древостоя расхождения уменьшаются.

Проведение различных рубок сопровождается изменением водно-физических характеристик почвогрунтов, восстановление которых затягивается на 30–40 лет. Наибольшей деформации подвергается почва в местах воздействия ходовой части машин, где образуется колея: на погрузочной площадке и волоке (технологический коридор). Плотность верхних слоев почвогрунтов возрастает на волоке в 1.2–1.9 раза. Наибольшие пределы колебаний полной влагоемкости в слое толщиной 10 см достигают 20–30 мм (от 80–70 до 55–50 мм). Расчетами установлено, что в зависимости от степени уплотнения, объемной массы и гранулометрического состава почвогрунтов отмечается как снижение, так увеличение до 10 мм наименьшей влагоемкости; влажность завядания в верхнем 10-сантиметровом слое при уплотнении возрастает, однако ее рост не превышает 10 мм. Изменения водно-физических характеристик почвогрунтов в результате перемещения лесозаготовительной техники могут привести к образованию дополнительного стока в первый год после рубок. В среднем можно принять, что дополнительный сток с отведенных для перемещения техники участков при рубках не превышает 30–40 мм. Величина стока с учетом доли этих участков составляет около 9–12 мм.

Соотношение величин испарения в зимний период с хвойного леса и поля зависит от массы хвои. Разница испарения с соснового леса и поля в большинстве случаев не превышает 5%. С высокопродуктивных сосняков и с основной части ельников снега испаряется больше, чем с поля, и при массе хвои 20–25 т/га превышение может достигать 17–30%. Получена формула для расчета этого соотношения в зависимости от массы хвои.

Преобразования водного баланса при гидролесомелиорации в период воздействия и переходный период (~5 лет) определяются появлением дополнительного стока из слоя осадки и осушаемого слоя. В зависимости от типа осушаемого леса суммарная величина этого стока составляет 240–260 мм. В последующие годы основное влияние на водный баланс оказывает преобразование растительного покрова, определяющее изменение испарения.

Изменение испарения после осушения заболоченных лесов и залесенных болот зависит от продолжительности осушения, типа и возраста осушаемого древостоя. Существенное увеличение испарения наблюдается при сочетании продолжительного периода осушения, продуктивного возраста древостоя и лучших лесорастительных условий. В среднем суммарное испарение с переувлажненных лесов и залесенных болот Карелии в результате их осушения для лесного хозяйства возросло примерно на 10% (~46 мм).

Изменение испарения после осушения и облесения болот зависит от трофности болота до осушения и возраста возникшего древостоя. В зависимости от этих факторов испарение с низинных болот изменяется от +170 до –30 мм (в среднем увеличивается на 80 мм), с переходных – от +130 до –40 мм (в среднем увеличивается на 40 мм), с верховых – от +70 до –50 мм (в среднем снижается на 10 мм).

В целом за счет преобразования природной среды Карелии путем гидролесомелиорации произошло снижение стока, величина которого по приблизительной оценке составляет  $0.26 \text{ км}^3$ .

Эксплуатация лесного фонда приводит к снижению формирующегося в лесу стока за счет снижения площади спелых и перестойных древостоев и роста площади более молодых и интенсивно расходываемых влагу лесов. Снижение стока с лесопокрытой части территории РК, составляющей около 60% ее площади, может достигать  $1.52 \text{ км}^3$  (~6%), что сопоставимо со стоком реки, площадью водосбора около  $5000 \text{ км}^2$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В. А.* Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 227 с.
2. *Алексеевский Н. И.* Малые реки // Россия: Социально-экологические водные проблемы. Екатеринбург, 1999. С. 176–213.
3. *Альтишуллер Н. В., Карпечко В. А.* Водохозяйственные аспекты лесосплава, лесной осушительной мелиорации и гидроэнергетики // Использование и охрана водных ресурсов бассейна Онежского озера (в границах Карельской АССР). Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1988. С. 49–61.
4. *Ананьев В. А., Раевский Б. В., Грабовик С. И.* Коренные еловые леса национального парка «Водлозерский»: структура, динамика и состояние // Водлозерские чтения: Естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера. Петрозаводск, 2006. С. 88–93.
5. *Андреанов А. А.* Водный баланс водосбора р. Томицы (Южная Карелия) // Сборник работ ЛГМО и ПГМО. Л., 1974. Вып. 8. С. 253–269.
6. *Андреанов А. А., Устинов Г. Н.* Элементы водного баланса осушенного болотного массива «Вилга» // Воднобалансовые исследования на сельскохозяйственных полях. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 123–125.
7. *Андрущенко А. П.* Проникновение осадков сквозь полог сосняков разного возраста // Исследования по лесоводству и защитному лесоразведению. Труды Харьков. с.-х. ин-та. 1977. Т. 240. С. 29–34.
8. *Аникиева В. А., Чертовский В. Г.* Об осадках как экологическом факторе в северотаежных черничниках // Экология таежных лесов. Архангельск, 1978. С. 43–53.
9. *Анучин Н. П.* Промышленная таксация леса. Вып. 5. М.; Л.: Гослесбуиздат, 1951. 287 с.
10. *Артемьев А. И., Тараканов А. М., Милейко Л. С., Панкратова Т. В.*

Реакция сосны на осушение в условиях северной подзоны тайги // Мелиорация лесов Европейского Севера. Архангельск, 1982. С. 40–50.

11. *Артемьев А. И., Чертовский В. Г., Мочалова Г. А.* Типы заболоченных лесов Европейского Севера и эффективность их гидромелиорации // Мелиорация лесов Европейского Севера. Архангельск, 1982. С. 9–28.

12. *Атрохин В. Г.* Лесоводство. М.: Лесная промышленность, 1976. 288 с.

13. *Атрохин В. Г., Иевинь И. К.* Рубки ухода и промежуточное лесопользование. М.: Агропромиздат, 1985. 255 с.

14. *Бабиков Б. В.* Гидрологический режим осушенных лесных болот, сформировавшихся на тяжелых почвах (на примере болота Гладкое Госненского района Ленинградской области) // Значение болот в биосфере. М.: Наука, 1980. С. 81–95.

15. *Бизюкин В. В.* Изменение водно-физических свойств почв под влиянием выборочных рубок в сосняках Хамар-Дабана // Защитная роль лесов Сибири. Красноярск, 1980. С. 130–139.

16. *Бизюкин В. В.* Экологические исследования выборочных рубок главного пользования в светлохвойных лесах Хамар-Дабана // Экологическое влияние леса на среду. Красноярск: Институт леса и древесины им. В. Н. Сукачева, 1977. С. 83–100.

17. *Бондарик Н. Л.* Формирование стока с лесных водосборов Карелии с учетом антропогенного воздействия: автореф. дис. ...канд. геогр. наук. СПб., 2001. 25 с.

18. *Бондарик Н. Л., Карпечко Ю. В.* Сравнение методов определения среднемноголетней величины испарения с леса // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 98–105.

19. *Бондарик Н. Л., Карпечко Ю. В.* Эколого-гидрологические последствия лесозексплуатации // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Финноскандии: Тез. докл. Междунар. конф. и выездной сессии отделения Общей биологии РАН. Петрозаводск, 1999. С. 181–182.

20. *Борисов Г. А., Сидоренко Г. И.* Энергетика Карелии. Современное состояние, ресурсы и перспективы развития. СПб.: Наука, 1999. 303 с.

21. *Братцев С. А.* Влияние вырубок леса на водный баланс территории Коми АССР // Влияние деятельности человека на природную среду Коми АССР. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1982. С. 45–57.

22. *Будаговский А. И.* Полуэмпирическая теория транспирации и водного режима растительного покрова // Водные ресурсы. 1989. № 6. С. 5–17.

23. *Будыко М. И.* Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.

24. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоздат, 1956. 256 с.
25. Бузыкин А. И., Исмаилов А. М., Суворов Г. Г., Щербатюк А. С. Оценка продуктивности деревьев и древостоев // Лесоведение. 1991. № 6. С. 16–25.
26. Булавко А. Г. Водный баланс речных водосборов. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 304 с.
27. Буренина Т. А. Динамика структуры водного баланса на вырубке среднегорного пояса Западного Саяна // Актуальные вопросы исследования лесов Сибири. Красноярск, 1981. С. 19–21.
28. Варлагин А. В. Транспирация на уровне листа, дерева и сообщества в хвойных лесах: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2000. 40 с.
29. Варлагин А. В., Выгодская Н. Н. Влияние эколого-морфологических факторов на устьичное сопротивление ели европейской // Лесоведение. 1993. № 3. С. 48–60.
30. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 312 с.
31. Владимиров А. М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 296 с.
32. Водные ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 214 с.
33. Водогрецкий В. Е., Крестовский О. И., Соколов Б. Л. Экспедиционные гидрологические исследования. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 231 с.
34. Волков А. Д. Природные особенности коренных лесов таежной зоны и проблемы их сохранения // Роль девственной наземной биоты в современных условиях глобальных изменений окружающей среды. Биотическая регуляция окружающей среды. Междунар. семинар. Гатчина, 1998. С. 234–247.
35. Волков А. Д. Сравнительная оценка экологической роли и биологической специфики коренных и производных лесов северо-запада таежной зоны России // Коренные леса таежной зоны Европы: современное состояние и проблемы сохранения. Петрозаводск: СДВ-ОПТИМА, 1999. С. 9–16.
36. Вомперский С. Э., Сирин А. А., Глухов А. И. Формирование и режим стока при гидролесомелиорации. М.: Наука, 1988. 168 с.
37. Воронков Н. А. Роль лесов в охране вод. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 287 с.
38. Выгодская Н. Н. Радиационный режим и структура горных лесов. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 260 с.
39. Высоцкий Г. Н. О гидрологическом и метеорологическом влиянии лесов. Изд. 2-е. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 112 с.

40. *Гаврилов В. Н.* Состояние и рост культуры сосны на осушенном переходном болоте в Южной Карелии // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Материалы конференции. М.: ГЕОС, 1999. С. 249–251.

41. *Галенко Э. П.* Задержание осадков пологом хвойного леса в северо-таежной подзоне Коми АССР // Труды Коми филиала АН СССР. 1973. № 26. С. 133–137.

42. *Галенко Э. П.* Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойного леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1983. 128 с.

43. *Гмурман В. С.* Теория вероятности и математическая статистика. М.: Высш. школа, 1972. 368 с.

44. *Горстко А. Б., Хайтер П. А.* Моделирование гидрологической роли леса // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XIII. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 227–240.

45. *Горшков В. В., Горшков В. Г., Макарьева А. М.* О необходимом соотношении площадей климаксовых и вторичных лесов // Коренные леса таежной зоны Европы: современное состояние и проблемы сохранения. Петрозаводск: СДВ-ОПТИМА, 1999. С. 82–83.

46. *Горшков В. Г., Макарьева А. М.* Биотическая регуляция окружающей среды: обоснование необходимости сохранения и восстановления естественной биоты на территориях материковых масштабов // Роль девственной наземной биоты в современных условиях глобальных изменений окружающей среды. Биотическая регуляция окружающей среды. Международный семинар. Гатчина, 1998. С. 3–33.

47. *Горшков В. В., Ярмишко В. Т.* Современные проблемы изучения лесов // Коренные леса таежной зоны Европы: современное состояние и проблемы сохранения. Петрозаводск: СДВ-ОПТИМА, 1999. С. 79.

48. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1994 году. Петрозаводск, 1995. 126 с.

49. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1997 году. Петрозаводск, 1998. 220 с.

50. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1998 году. Петрозаводск, 1999. 264 с.

51. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1999 году. Петрозаводск, 2000. 214 с.

52. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Коми в 1999 году. Сыктывкар, 1999. 280 с.

53. *Грабовик С. И.* Динамика растительного покрова болотных массивов мезотрофного травяно-сфагнового типа под влиянием осушения // Ботанический журнал. 1989. Т. 74, № 12. С. 1757–1768.

54. *Грабовик С. И.* Динамика растительного покрова и биологической продуктивности сосняка кустарничково-осоково-сфагнового под влиянием осушения // Биоразнообразие, динамика и охрана болотных экосистем восточной Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 63–72.

55. *Грибов А. И.* Гидрологическая роль березовых лесов южной части Красноярского края // Стационарные гидрологические исследования в лесах Сибири. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1975. С. 43–68.

56. *Громцев А. Н.* Ландшафтные закономерности структуры и динамики среднетаежных лесов Карелии. Петрозаводск, 1993. 159 с.

57. *Громцев А. Н.* Современное состояние и проблемы сохранения коренных лесов на западе таежной зоны России // Лесоведение. 2002. № 2. С. 3–7.

58. *Гусев Е. М., Насонова О. Н.* Параметризация теплообмена поверхности суши с атмосферой // Водные проблемы на рубеже веков. М.: Наука, 1999. С. 152–171.

59. *Дьяконов В. В., Иванчиков А. А.* Влияние колесной техники на древостой и напочвенный покров при проведении прореживаний в лесах Карелии // Лесоводственные и экологические последствия рубок в лесах Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1986. С. 137–146.

60. *Дюнин А. К.* В царстве снега. Новосибирск: СО Наука, 1983. 161 с.

61. *Еруков Г. В., Власкова Г. В.* Гидротермический режим почв сосновых лесов Карелии. Л.: Наука, 1986. 111 с.

62. *Зайцева И. В., Кобяков К. Н., Никонов В. В., Смирнов Д. Ю.* Коренные старовозрастные леса Мурманской области // Лесоведение. 2002. № 2. С. 14–22.

63. *Заугольнова Л. Б., Платонова Е. А.* Подходы к определению коренных типов леса // Коренные леса таежной зоны Европы: современное состояние и проблемы сохранения. Петрозаводск: СДВ-ОПТИМА, 1999. С. 82–83.

64. *Зябченко С. С.* Сосновые леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1984. 248 с.

65. *Иверонова М. И.* К вопросу об испарении со снежного покрова на территории СССР // Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 36–53.

66. *Идзон П. Ф., Пименова Г. С.* Влияние леса на сток рек. М.: Наука, 1975. 112 с.

67. *Кадеров Э. А.* Особенности формирования снежного покрова в Красноярской лесостепи // Защитная роль лесов Сибири. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева, 1980. С. 69–78.

68. *Казакевич Д. И.* Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 320 с.

69. *Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С. и др.* Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.

70. *Казимиров Н. И., Митруков А. Е.* Изменчивость и математическая модель фитомассы сосновых деревьев и древостоев // Формирование и продуктивность сосновых насаждений Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1978. С. 142–149.

71. *Казимиров Н. И., Морозова Р. М.* Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.

72. *Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. К.* Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л.: Наука, 1978. 216 с.

73. *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.

74. *Кайрюкитис Л., Шакунас З.* Воздействие лесных машин на почву // Лесное хозяйство. 1990. № 8. С. 37–40.

75. *Калиниченко Н. П., Писаренко А. И., Смирнов Н. А.* Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 382 с.

76. *Калюжный И. Л., Карпечко Ю. В., Нестеренко И. М.* Влияние осушения болот на стокоформирующие факторы весеннего половодья // Пути повышения эффективности мелиораций. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1990. С. 13–22.

77. *Калюжный И. Л., Павлова К. К., Лавров С. А.* Гидрофизические исследования при мелиорации переувлажненных земель. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 261 с.

78. *Калюжный И. Л., Павлова К. К., Попов Б. А.* Биогеофизические условия взаимодействия твердых осадков с пологом хвойного леса // Вестник ЛГУ. 1979. Вып. 4, № 24. С. 82–90.

79. *Карпечко А. Ю.* Изменение плотности и коренасыщенности почв под влиянием лесозаготовительной техники в еловых лесах южной Карелии // Лесоведение. 2008. № 5. С. 66–70.

80. *Карпечко Ю. В.* Влагооборот корнеобитаемого слоя осушенного торфяника // Формирование луговых агроценозов на мелиорированных землях. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1984. С. 123–135.

81. *Карпечко Ю. В.* Влияние характеристик леса на водность рек Карелии // Вопросы экологии и гидрологические расчеты. Сборник научных трудов (межведомственный). Вып. 116. СПб.: РГГМИ, 1994. С. 38–42.

82. *Карпечко Ю. В.* Гидрологическая оценка антропогенного воздействия на водосборы в таежной зоне Европейского Севера России: автореф. дис. ... докт. геогр. наук: 25.00.27. СПб., 2004. 49 с.

83. *Карпечко Ю. В.* Исследование водного баланса малых водосборов Корзинской низины // Почвенно-мелиоративные исследования в Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1986. С. 23–43.

84. *Карпечко Ю. В.* Оценка гидрологической роли антропогенных изменений в условиях севера европейской части России // Известия РАН. Серия географическая. 2006. № 4. С. 68–75.

85. *Карпечко Ю. В.* Оценка пространственной и временной неоднородности задержания жидких осадков пологом леса // Лесоведение. 1997. № 4. С. 64–70.

86. *Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л.* Влияние возможного потепления на испарение с лесных водосборов Восточной Фенноскандии // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 1. С. 103–106.

87. *Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л., Кривоногов М. Н.* Формирование снежного покрова на лесных водосборах Карелии // Лесоведение. 1999. № 3. С. 68–71.

88. *Карпечко Ю. В., Нестеренко И. М.* Водный и тепловой режим осушаемых болот и заболоченных земель Карелии. Петрозаводск, 1996. 120 с.

89. *Карпечко Ю. В., Нестеренко И. М., Осипов В. В.* Изменение стока с осушаемых болот и заболоченных земель при их эксплуатации в сельскохозяйственном производстве // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 4. С. 401–406.

90. *Карпечко Ю. В., Саковец В. И.* Постмелиоративные изменения элементов водного баланса водосборов Карелии // Водные ресурсы. 1997. Т. 24, № 3. С. 266–269.

91. *Кищенко Т. И., Козлов И. Ф.* Леса Карельской АССР // Леса СССР. Т. 1. М.: Наука, 1966. 458 с.

92. *Книзе А. А., Крестовский О. И.* Определение влияния структуры лесного фонда на водность рек. Методические рекомендации. СПб.: СПбНИИЛХ, 1993. 74 с.

93. *Коновалов В. Н.* Эколого-физиологические особенности сосны и ели на осушенных и удобренных торфяных почвах Севера // Мелиорация лесов Европейского Севера. Архангельск, 1982. С. 66–75.

94. *Константинов В. К., Красильников Н. А., Хитрин С. В.* Современное состояние гидролесомелиорации: актуальные практические и научные задачи // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Материалы конференции. М.: ГЕОС, 1999. С. 261–264.

95. *Коронкевич Н. И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.

96. *Корчагин А. А., Нейштадт М. И.* Растительность // Север Европейской части СССР. М.: Наука, 1966. С. 212–256.

97. *Косицкий А. Г.* К проблеме выделения малых рек // Малые реки: современное экологическое состояние, актуальные проблемы. Международная научная конференция. Тольятти, 2001. С. 108.

98. *Крестовский О. И.* Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 118 с.

99. *Крестовский О. И.* Принципы оценки и прогноза потерь весенних вод на водосборах Северо-Запада ЕТС // Тр. ГГИ. 1972. Вып. 194. С. 46–61.

100. *Крестовский О. И.* Формирование стока воды со склонов и малых водосборов. Курсы ЮНЕСКО. 9 сессия. Ч. II. М.: Гидрометеиздат, 1979. С. 21–26.

101. *Крестовский О. И., Постников А. Н., Сергеева А. Г.* Оценка испарения с леса в ранний весенний период // Труды ГГИ. 1979. Вып. 259. С. 75–86.

102. *Куусела К.* Понятия и основы лесоустройства европейских северных хвойных лесов Финляндии и России. Хельсинки, 1997. 96 с.

103. *Кучмент Л. С., Мотовилов Ю. Г., Старцева З. П.* Моделирование влагопереноса в системе почва – растительность – приземный слой атмосферы // Водные ресурсы. 1989. № 2. С. 32–39.

104. *Лазарев Н. А.* Леса Коми АССР // Леса СССР. М.: Наука, 1966. С. 197–217.

105. *Лебедев А. В.* Гидрологическая роль горных лесов Сибири. Новосибирск: Наука, 1982. 184 с.

106. *Ленева Л. Н.* Влияние лесозаготовительной техники на водно-физические свойства почвы // Системы рубок в лесах Северо-Запада РСФСР. Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. С. 126–130.

107. Лесотаксационные таблицы. Петрозаводск, 1976. 33 с.

108. Лесотаксационный справочник. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.

109. *Лохов Д. П.* Учет осадков, задерживаемых лесом, методом дождевания // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 97–104.

110. *Лукин И. Н.* О приспособляемости брусники к условиям вырубки // Проблемы повышения продуктивности лесов и перехода на непрерывное рациональное лесопользование в свете решений XXVI съезда КПСС. Тезисы докладов на всесоюзной научно-практической конференции. Архангельск, 1983. С. 87–88.

111. *Лучшев А. А.* Испарение и испаряемость в лесу и в поле // Труды ВНИИЛХ. 1940. Вып. 18. С. 269–278.

112. *Лучшев А. А.* Осадки под пологом леса // Водоохранная роль леса. Труды ВНИИЛХ. 1940. Вып. 18. С. 113–148.

113. *Львов П. Н., Панов А. А.* Пути естественного облесения вырубок Севера. Архангельское книжное изд-во, 1960. 96 с.

114. *Макарчук В. А.* Влияние мелиорации на уровенный режим грунтовых вод прилегающей к болотному массиву территории на примере объекта «Верховье рек Ясельда и Нарев» // *Осушительные и осушительно-увлажнительные системы*. Минск: БелНИИМиВХ, 1986. С. 190–196.

115. *Маслов Б. С.* Современные вопросы мелиорации болот для сельскохозяйственных целей // *Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования*. Материалы конференции. М.: ГЕОС, 1999. С. 301–307.

116. *Маслов Б. С., Минаев И. В.* Мелиорация и охрана природы. М.: Россельхозиздат, 1985. 272 с.

117. *Маслов Б. С., Минаев И. В., Губер К. В.* Справочник по мелиорации. М.: Росагропромиздат, 1989. 384 с.

118. *Матвеев П. Н.* Формирование снежного покрова в еловых лесах Тянь-Шаня // *Лесоведение*. 1968. № 1. С. 79–83.

119. *Медведев Н. А.* Леса Европейского Севера и их промышленная эксплуатация. М.: Гослесбумиздат, 1962. 126 с.

120. *Медведева В. М.* Изменение фитомассы заболоченных сосняков под влиянием осушения // *Лесные растительные ресурсы Карелии*. Петрозаводск, 1974. С. 52–70.

121. *Медведева В. М.* Формирование лесов на осушенных землях среднетаежной подзоны. Петрозаводск: Карелия, 1989. 168 с.

122. *Мелехов И. С.* Леса Мурманской области // *Леса СССР*. М.: Наука, 1966. С. 70–77.

123. *Мелехов И. С., Чертовский В. Г., Моисеев В. А.* Леса Архангельской и Вологодской областей // *Леса СССР*. Т. 1. М.: Наука, 1966. С. 78–156.

124. Мелиорация и водное хозяйство. 3. Осушение: Справочник / Под ред. Б. С. Маслова. М.: Агропромиздат, 1985. 447 с.

125. Методы изучения и расчета водного баланса. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 399 с.

126. *Мичурин Б. Н.* Новые методы определения некоторых водных свойств почв и грунтов // *Сборник работ по методике исследований в области физики почв*. Л.: АФИ, 1964. С. 164–170.

127. *Молодцов В.* Плантационное лесовыращивание в мире // *Лесное хозяйство*. 2000. № 2. С. 54.

128. *Молчанов А. А.* Гидрологическая роль леса. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 488 с.

129. *Молчанов А. А.* Дендроклиматические основы прогнозов погоды. М.: Наука, 1976. 168 с.

130. *Молчанов А. А.* Зависимость продуктивности древостоев в лесах таежной зоны от изменения условий среды // *Лесоведение*. 1967. № 1. С. 16–23.

131. *Молчанов А. А.* Сосновый лес и влага. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 140 с.
132. *Молчанов А. Г.* Соотношение фотосинтеза и транспирации у сосны обыкновенной в условиях южной тайги // Лесоведение. 1986. № 4. С. 76–82.
133. *Молчанов А. Г., Татаринов Ф. А.* Изменчивость световых кривых фотосинтеза в пределах кроны ели // Лесоведение. 1993. № 3. С. 61–70.
134. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 112 с.
135. Наставление по рубкам ухода. Петрозаводск, 1995. 39 с.
136. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Ч. 1–6. Вып. 1–3. Л.: Гидрометеоздат, 1988, 1989.
137. *Нестеренко И. М.* Влияние сельско- и лесохозяйственных мелиораций в бассейне р. Олонки на изменение режима речного стока // Водный и тепловой режим осушаемых почв Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1981. С. 63–75.
138. *Нестеренко И. М.* Мелиорация земель Европейского Севера СССР. Л.: Наука, 1979. 360 с.
139. *Новиков С. М., Гончарова Ж. С.* Обзорная информация. Влияние мелиораций на водный режим болот, сельскохозяйственных полей и речных бассейнов в Нечерноземной зоне. Обнинск: Информационный центр ВНИИГМИ-МЦД, 1984. 50 с.
140. *Новиков С. М., Гончарова Ж. С.* Прогноз изменений водных ресурсов крупных рек СССР под влиянием осушительных мелиораций // Труды ГГИ. 1978. Вып. 255. С. 54–68.
141. *Новиков С. М., Усова Л. И.* Новые данные о площади болот и запасах торфа на территории России // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск, 2000. С. 49–52.
142. *Обыденников В. И., Кожухов Н. И.* Типы вырубок и возобновление леса. М.: Лесная промышленность, 1977. 176 с.
143. *Онучин А. А., Борисов А. Н.* Влияние темнохвойных лесов Хамар-Дабана на формирование снежного покрова // Средообразующая роль лесных экосистем Сибири. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1983. С. 95–105.
144. *Орлов Е. Д.* Грунтовое водное питание на объектах лесосушения в Карелии. Л.: Наука, 1991. 164 с.
145. *Пахучий В. В.* Коренные леса Республики Коми: состояние и проблемы охраны // Лесоведение. 2002. № 2. С. 8–13.
146. *Пензов Ю. Е.* Элементы математической логики и теории множеств. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1968. 143 с.

147. *Пенман Х. Л.* Растения и влага. Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 163 с.

148. *Перегуда Л. В., Плюта П. Г.* Количественная оценка задержания жидких осадков лесными насаждениями разного состава // Лесоведение. 1985. № 4. С. 34–40.

149. *Пименова Г. С.* Влияние лесистости бассейнов на сток рек южной части Европейской территории СССР: автореф. дис. ...канд. биол. наук. Киев, 1987. 18 с.

150. *Побединский А. В.* Рубки и возобновление в таежных лесах СССР. М.: Лесная промышленность, 1973. 200 с.

151. *Помазнюк В. А.* Лесовосстановление на концентрированных вырубках Среднего Урала // Лесное хозяйство. 1980. № 7. С. 26–28.

152. *Попов Е. Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеоиздат, 1963. 396 с.

153. *Потаевич Е. В., Кучко А. А., Яковлева В. И.* К физиологии березы пушистой на осушенном и неосушенном болоте // Стационарное изучение болот и заболоченных лесов в связи с мелиорацией. Петрозаводск, 1977. С. 3–55.

154. Производительность еловых насаждений по типам леса (экологические нормативы). Научные рекомендации. Петрозаводск, 1991. 44 с.

155. Производительность сосновых насаждений по типам леса (экологические нормативы). Научные рекомендации. Петрозаводск, 1990. 43 с.

156. *Протопопов В. В.* Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука, 1975. 328 с.

157. *Пьявченко Н. И., Сабо Е. Д.* Основы гидроресомелиорации. М.: Гослесбумиздат, 1962. 381 с.

158. *Раунер Ю. Л.* Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 210 с.

159. *Рахманов В. В.* Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная промышленность, 1984. 241 с.

160. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 96 с.

161. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Ч. 1. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 528 с.

162. *Ронконен Н. И.* Вырубки и естественное лесовозобновление на них // Лесовосстановление в Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1975. С. 36–65.

163. *Рубцов М. В., Дерюгин А. А., Салмина Ю. Н., Гурицев В. И.* Водорегулирующая роль таежных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 224 с.

164. *Рудаков В. Е.* О независимости соотношения между величинами транспирации и массы хвои у сосны обыкновенной от погодных условий // Изв. ВГО. 1979. Т. III. Вып. 2. С. 168–170.

165. *Руднев Н. И.* Радиационный баланс леса. М.: Наука, 1977. 128 с.
166. *Русецкас Ю. Ю.* Суммарное испарение в орошаемых культурах ели на осушенном болоте // Лесоведение. 1991. № 2. С. 24–33.
167. *Рутковский В. И., Кузнецова З. И.* Влияние насаждений на снеговой режим // Труды ВНИИЛХ. Вып. 18. 1940. С. 149–180.
168. *Сабо Е. Д.* Некоторые результаты исследований формирования снежного покрова в лесу // Снежный покров, его распространение и роль в народном хозяйстве. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 98–103.
169. *Саковец В. И.* Биосферная роль гидролесомелиорации на Северо-Западе таежной зоны России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 16 с.
170. *Саковец В. И., Иванчиков А. А.* Динамика лесопользования и состояние лесного фонда Карелии // Лесоводственно-экологические аспекты хозяйственной деятельности в лесах Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. С. 8–18.
171. *Свалов Н. Н.* Моделирование производительности древостоев и теория лесопользования. М.: Лесная промышленность, 1979. 216 с.
172. *Сенов С. Н.* Уход за лесом. Экологические основы. М.: Лесная промышленность, 1984. 128 с.
173. *Сенькина С. Н.* Водный обмен хвои деревьев ели разного возраста // Лесоведение. 1998. № 1. С. 60–68.
174. *Сенькина С. Н.* Водный обмен хвои сосны // Комплексные биогеоценологические исследования хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Тр. Коми филиала АН СССР. № 73. Сыктывкар, 1985. С. 46–55.
175. *Сенькина С. Н.* Изменение водного режима хвои сосны в зависимости от условий произрастания // Лесоведение. 2002. № 1. С. 24–29.
176. *Серый В. С., Анисеева В. А., Вялых Н. И., Кубрак Н. И.* Изменение лесорастительных условий вырубок при современных лесозаготовках // Экологические исследования в лесах Европейского Севера. Архангельск: АИЛиЛХ, 1991. С. 3–15.
177. *Серый В. С., Засухин Д. П., Вялых Н. И.* Влияние нарушений почвенного покрова при сплошных рубках на последующее возобновление и рост молодняков // Лесное хозяйство. 1997. № 4. С. 27–29.
178. *Сидорович Е. А., Мотыль М. М.* Световой режим напочвенного покрова хвойных фитоценозов. Минск: Наука и техника, 1986. 152 с.
179. *Слейчер Р.* Водный режим растений. М.: Мир, 1970. 365 с.
180. *Смоляк Л. П.* Болотные леса и их мелиорация. Минск: Наука и техника, 1969. 209 с.
181. *Соколовский Д. Л.* Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 540 с.
182. *Сорочан О. Г.* Оценка изменения влагооборота крупных природных регионов под влиянием осушения // Труды ГГИ. 1974. Вып. 222. С. 180–192.

183. Состояние окружающей среды Северо-Западного и Северного регионов России. СПб.: Наука, 1995. 370 с.
184. Справочник. Лесной фонд России (по учету на 1 января 1993 г.). М.: ВНИИЦлесресурс, 1995. 281 с.
185. Справочник по климату СССР. Вып. 3. Ч. II. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 343 с.
186. Справочник по климату СССР. Вып. 1–3, 7–11, 17, 20–25. Ч. IV. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 328 с.
187. *Старцева З. П.* Использование модели влагопереноса для оценки суммарного испарения в ельниках Валдая // Лесоведение. 2000. № 5. С. 53–58.
188. *Старцева З. П.* Исследование влияния почвенных и метеорологических характеристик на суммарное испарение с помощью модели влагопереноса в системе почва – растительность – атмосфера // Водные ресурсы. 1999. Т. 26, № 4. С. 438–445.
189. Структурно-функциональная организация, продуктивность и устойчивость лесных таежных экосистем Карело-Кольского региона // Отчет о НИР по теме 105. № гос. регистрации 01900037734. Петрозаводск, 1995. 330 с.
190. *Субботин А. И.* Сток талых и дождевых вод. М.: Гидрометеоздат, 1966. 376 с.
191. *Субботин А. И., Дыгало В. С.* Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне реки Москвы. М.: Гидрометеоздат, 1991. 264 с.
192. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. А. А. Сирина, Т. Ю. Минаевой. М.: ГЕОС, 2001. 191 с.
193. *Усольцев В. А.* Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 637 с.
194. *Федоров С. Ф.* Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 264 с.
195. *Федоров С. Ф.* О влиянии вырубki леса на изменение элементов его водного баланса // Труды ГГИ. 1979. Вып. 258. С. 30–44.
196. *Федоров С. Ф.* Определение транспирации еловыми насаждениями по коэффициенту транспирационной активности // Труды ГГИ. 1981. Вып. 279. С. 32–34.
197. *Федоров С. Ф., Марунич С. В.* Гидрологическая роль леса. Обзорная информация. Серия: Гидрология суши. Вып. 2. Обнинск, 1985. 43 с.
198. *Федоров С. Ф., Марунич С. В.* Об изменении состояния лесного биогеоценоза под влиянием лесохозяйственных мероприятий // Гидрологические исследования ландшафтов. Новосибирск: Наука СО, 1986. С. 97–102.

199. Федоров С. Ф., Марунич С. В., Буров А. С., Ральцевич Н. Д. Изменение структуры водного и теплового баланса залесенных территорий под влиянием вырубок // Труды ГГИ. 1981. Вып. 279. С. 20–31.
200. Федоров С. Ф., Марунич С. В., Федоров А. С. Исследование суммарного испарения с различных по составу и возрасту лесных насаждений // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот. М.: Наука, 1990. С. 41–53.
201. Харитонов Л. П. Модель для расчетов проникновения осадков под полог смешанных древостоев // Лесоведение. 1977. № 1. С. 74–83.
202. Хильми Г. Ф. Основы физики биосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 299 с.
203. Хильми Г. Ф. Теоретическая биогеофизика леса. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 206 с.
204. Цельникер Ю. Л. Радиационный режим под пологом леса. М.: Наука, 1969. 218 с.
205. Цельникер Ю. Л. Развитие и современное состояние фитоактинометрических исследований в лесных фитоценозах СССР // Современные вопросы лесоведения и лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1974. С. 39–59.
206. Цытович Н. А. Механика грунтов. М.; Л.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. 328 с.
207. Чесноков В. А. Особенности формирования стока и его отдельных фаз при лесосушении // Водный и тепловой режим осушаемых почв Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1981. С. 75–87.
208. Чубатый О. В. Влияние леса и его вырубки на водный баланс водосборов (на примере Карпат) // Лесоведение. 1980. № 2. С. 59–67.
209. Чубатый О. В. О формировании стока с горных склонов под букowymi и еловыми лесами Карпат // Лесоведение. 1971. № 3. С. 78–80.
210. Шашкин Е. А., Ваганов Е. А. Динамика прироста площадей сечений стволов у деревьев в разных районах Сибири в связи с глобальными изменениями температуры // Лесоведение. 2000. № 3. С. 3–11.
211. Шебеко В. Ф. Влияние осушительных мелиораций на водный режим территорий. Минск: Ураджай, 1983. 200 с.
212. Шевелев Н. Н. Перехват вертикальных и горизонтальных осадков в лесах Среднего Урала // Лесоведение. 1977. № 6. С. 38–48.
213. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 335 с.
214. Шпак И. С. Влияние леса на водный баланс водосборов. Киев: Наукова думка, 1968. 284 с.
215. Шульгин Н. И. О состоянии работ по дорожному и гидроресомелиоративному строительству в России // Гидроресомелиорация: Наука-производству: Материалы совещания. СПб.: СПбНИИЛХ, 1966. 143 с.

216. *Шумаков В. С., Воронкова А. Б., Исаев В. И., Мурзаева М. К.* Изменение водно-физических свойств почв Урала под влиянием рубок и механизированных заготовок // Изменение водоохранно-защитных функций лесов под влиянием лесохозяйственных мероприятий. Пушкино, 1973. С. 18–34.

217. *Шутов В. А.* Распределение запасов воды в снежном покрове на водосборах лесной зоны // Метеорология и гидрология. 1994. № 9. С. 85–92.

218. *Щербаков Н. М., Зайцева Н. Л.* Биометрические характеристики спелых ельников юга Карелии // Лесные растительные ресурсы Южной Карелии. Петрозаводск, 1971. С. 22–40.

219. *Яковлев Г. В., Увакин М. И.* Влияние лесозаготовительной техники на водно-физические свойства почвы // Лесное хозяйство. 1985. № 2. С. 30–33.

220. *Яновский Л. Н., Мусеев В. С., Ларионова Г. Г.* Лесная таксация. Методические указания по учету древесной зелени для студентов специальности 1512. Л.: ЛТА, 1985. 38 с.

221. *Bidlake W. R., Woodham W. M., Lopez M. A.* Evapotranspiration from areas of native vegetation in west-central Florida. U. S. Geological survey water-supply paper 2430. Washington, 1996. 36 p.

222. *Chen T. N., Henderson-Sellers A., Milly P. C. D. et al.* Cabauw experimental results from the for intercomparison of land-surface parameterization schemes // J. Climate. 1997. Vol. 10, N 6. P. 1194–1215.

223. *Ettala M.* Evapotranspiration from a *Salix aquatica* plantation at a sanitary landfill // Aqua-Fennica. 1988. Vol. 18. 1. P. 3–14.

224. *Federer C. A., Gee G. W.* Diffusion resistance and xylem potential in stressed and unstressed northern hardwood trees // Ecology. 1976. Vol. 57, N 5. P. 975–984.

225. *Finer L., Heimala-Raimas R. & Päävänen J.* Tree stands and ground vegetation in two watersheds in the Nurmes-research area // Aqua-Fennica. 1988. Vol. 18. 1. P. 47–60.

226. *Golding D. L., Swanson R. H.* Snow accumulation and melt in small forest openings in Alberta // Can J. Forest. 1978. N 8. P. 380–388.

227. *Golding D. L., Swanson R. H.* Snow distribution patterns in clearings and adjacent forest // WRR. 1986. V. 22, N 13. P. 1931–1940.

228. *Heikurainen L.* Comparison between runoff conditions on a virgin peatland and a forest drainage area // Proc. of the 5th Intern. peat. Congr. Poznan. Poland, 1976. 1. P. 76–86.

229. *Hutingsford C., Cox P. M.* Use of statistical and neural network techniques to detect how stomatal conductance responds to changes in the local environment // Ecological modelling. 1997. Vol. 97. P. 217–246.

230. *Jarvis P. G.* The interpretation of the variations in leaf water potential

and stomatal conductance found in canopies in the field // Phil. Trans. R. Soc. London, 1976. Vol. 273, B. P. 593–610.

231. Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Effect of potential warming on evapotranspiration from forest catchments in Karelia // Nordic Hydrology. 2003. Vol. 34, N 3. P. 147–160.

232. Korner Ch. et al. Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants // Photosynthetica. 1979. Vol. 13. P. 45–82.

233. Laine J., Vasander H., Pyhalainen A. Effect of forest drainage on the carbon balance of mire ecosystems // Proc. 9 Intern. peat. Congr. Uppsala, 1992. P. 170–181.

234. Lexer M. J. Anwendung eines «big leaf»-Modelles zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes in Fichtenbeständen // Centralblatt für das gesamte Forstwesen. 1995. J. 112. H. 4. S. 209–225.

235. Loveys B. R., Leopold A. C., Kriedemann P. E. Abscisic acid metabolism and stomatal physiology in *Betula lutea* following alteration in photoperiod // Annals of Botany 38. 1974. P. 85–92.

236. Lundin L. Impacts of drainage for forestry on runoff and water chemistry // Proceedings of the international symposium on the hydrology of wetlands in temperate and cold regions. Joensuu, Finland 6–8 June 1988. Vol. 1. Helsinki, 1988. P. 197–205.

237. Lundin L. Impacts of forest drainage on flow regime // Studia Forestalia Suecica. Uppsala. Swedish University of agricultural Sciences, 1994. N 192. P. 22.

238. Mascart P. et al. Canopy resistance formulation and its effect in mesoscale models: a HAPEX perspective // Agricultural and Forest Meteorology. 1991. Vol. 54. P. 319–351.

239. Monteith J. L. Evaporation and environment, in Fogg G. E. ed. The state and movement of water in living organisms. Symposium no. 19 of the Society for experimental Biology. New York: Academic Press, 1965. V. 19. P. 205–234.

240. 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. N 194. P. 19.

241. Parker W. C., Mohammed G. H. Photosynthetic acclimation of shade-grown red pine (*Pinus resinosa* Ait.) seedlings to a high light environment / New Forests. 2000. Vol. 19. P. 1–11.

242. Penman H. L. Evaporation: An introductory survey // Netherlands Journal of Agricultural Sciences. 1956. Ser. A. V. 4. P. 9–29.

243. Persson G. Water balance of willow stands in Sweden. Field studies and model applications // Uppsala. Swedish University of agricultural Sciences, 1995. 27 p.

244. *Seuna P.* Effect of clear-cutting and forestry drainage on runoff in the Nurmes-study // Proceedings of the international symposium on the hydrology of wetlands in temperate and cold regions. Joensuu, Finland 6–8 June 1988. Vol. 1. Helsinki, 1988. P. 122–134.

245. *Seuna P.* Small basing - a tool in scientific and operational hydrology. Publications of the water research institute. Helsinki, 1983. N 51. 61 p.

246. *Sivola U.* Carbondioxide dynamics in mires reclaimed for forestry in eastern Finland // Ann. Bot. Fenn. 1986. Vol. 23. P. 59–67.

247. *Stewart J. B.* Modelling surface conductance of pine forest // Agricultural and Forest Meteorology. 1988. Vol. 43. P. 19–35.

248. *Tallaksen L. M., Schunselaar S. and van Veen R.* Comparative model estimates of interception loss in a coniferous forest stand // Nordic Hydrology. 1996. Vol. 27, N 3. P. 143–160.

Научное издание

**Ю. В. Карпечко, Н. Л. Бондарик**

**ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
И ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ РАБОТ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ  
ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ**

*Печатается по решению Ученого совета  
Института водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН*

Редактор *М. А. Радостина*  
Оригинал-макет *Т. Н. Люрина*

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Times».  
Уч.-изд. л. 12,0. Усл. печ. л. 13,02. Подписано в печать 13.12.2010.  
Тираж 300 экз. Изд. № 139. Заказ № 925

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