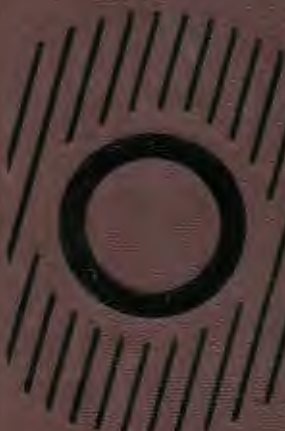


Н.Н. Выгодская

A stylized graphic element on the left side of the cover, consisting of a central black circle surrounded by several concentric rings of short, parallel black lines, resembling a sun or a radiation symbol.

**РАДИАЦИОННЫЙ
РЕЖИМ
И СТРУКТУРА
ГОРНЫХ ЛЕСОВ**

С удовольствием
Чл. 1

Н. Н. Выгодская

**РАДИАЦИОННЫЙ
РЕЖИМ
И СТРУКТУРА
ГОРНЫХ ЛЕСОВ**



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1981

Рецензенты:

д-р биол. наук *Х. Г. Тооминг* (Эстонская агрометеорологическая лаборатория Всесоюзного научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии),
д-р геогр. наук *З. И. Пивоварова* (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова)

Ответственные редакторы:

д-р физ.-мат. наук *Ю. К. Росс*, д-р биол. наук *И. А. Шульгин*

Рассматривается трансформация солнечной радиации в горных лесах под влиянием ~~факторов~~ факторов, рельефа и собственно растительности. Количественно оценена роль леса при определении прихода радиации к подстилающей поверхности склонов. Показана универсальность законов ослабления солнечной радиации в различных типах растительного покрова, которая достигается в естественных сообществах через процессы саморегуляции структуры, обеспечивающие максимально возможное заполнение объема растительного покрова фитоэлементами. Выявлены характерные черты радиационного режима горных лесов. Рассмотрена реакция отдельных компонентов растительности на условия прихода радиации в различных местообитаниях. Рассчитана на метеорологов, агрометеорологов, экологов, биогеоценологов, ботаников, лесоводов, ландшафтоведов, физгеографов, геоморфологов, почвоведов. Может быть также использована в качестве методического пособия в курсе лекций по микроклиматологии и биогеоценологии.

The book by N. N. Vygodskaya "Solar Radiation Regime and Structure of Mountain Forests" considers transformation of solar radiation in mountain forests under the influence of climatic factors, relief and vegetation.

Climate-forming role of the forest, in particular the determination of the solar radiation input to the surface of afforested slopes is evaluated. Universality of laws of reducing the solar radiation in various natural plant communities due to the self-regulation of their structure is shown. Specific features of the radiation regime in mountain forests are revealed. The response of some vegetation components to the conditions of the solar radiation input in various sites is considered.

The book is destined for specialists in meteorology, agrometeorology, ecology, biogeocenology, botany, forestry, geomorphology, soil science, etc. The work can be applied as a methodical text-book in the course of lectures on microclimatology and biogeocenology.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ

За последние десятилетия появилось немало работ экспериментального характера по различным аспектам актинометрии, и в частности по фитоактинометрии. В уже изданных книгах рассмотрены вопросы радиационного режима, как правило, горизонтально однородной подстилающей поверхности — почв, посевов сельскохозяйственных культур, водоемов и т. д. В справочниках и других подобных изданиях по актиноклиматологии приводятся данные, в основном относящиеся к приходу солнечной радиации также на горизонтальную поверхность.

Но ведь не вся суша Земли горизонтальная и гладкая, и каждому естествоиспытателю очевидно, что существующие на земном шаре возвышенности, холмы и горы оказывают большое влияние на протекание природных процессов, в том числе на приход, поглощение и превращение энергии солнечной радиации. Экспозиция склонов гор и холмов, их крутизна являются основными причинами различий в приходе радиации, которая во многом определяет характер распределения растительности на склонах.

Среди литературы по актинометрии количество работ, посвященных радиационному режиму наклонных поверхностей, очень невелико. В СССР наиболее детально этот вопрос рассмотрен в монографии К. Я. Кондратьева, З. И. Пивоваровой, М. П. Федоровой «Радиационный режим наклонных поверхностей» (Гидрометеиздат, 1978). Совсем мало работ, посвященных особому фитоактинометрическому объекту — горным лесам. Между тем история человечества показала, что горные леса имеют ключевое значение для окружающих их территорий. Вырубка горных лесов сопутствовала, как правило, эрозия, существенное ухудшение гидрометеорологического режима, опустошение земель и даже исчезновение целых цивилизаций.

Однако сами по себе горные леса являются весьма трудным объектом для исследователя. Большая изменчивость рельефа, различная крутизна и ориентация склонов, вариабельность

видового состава растительности, трудности методического, технического и экспедиционного характера — все эти обстоятельства являются причиной того, что в настоящее время так мало систематических данных о радиационном режиме горных лесов и их роли в микроклимате и продукционном процессе растительности.

Предлагаемая читателю книга Н. Н. Выгодской является, насколько нам известно, первой в мировой литературе монографией, посвященной радиационному режиму и структуре горных лесов. В книге приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по оценке режима прихода радиации к склонам конкретных регионов. Ее ценность заключается в том, что эти материалы используются для показа различий в энергетике склонов разных экспозиций и, следовательно, радиационных ресурсов растительного покрова как за сутки, так и за период активной вегетации лесных пород. Таблицы прихода радиации к склонам в зависимости от их специфики, а также от режима облачности представляют и самостоятельный интерес как справочный материал.

В монографии детально рассмотрена структура растительного покрова — плотность и характер размещения деревьев на единице площади склона, распределение фитоэлементов и степень заполнения ими пространства, что оценивается по анализу фотографий и по результатам прямых актинометрических измерений под пологом леса. В свою очередь подобные измерения дали возможность судить о том, в какой мере коротковолновая радиация (ФАР и БИКР) ослабляется пологом в целом и каков суточный ход этого ослабления.

С нашей точки зрения, основная ценность книги не в том, что в ней приведены параметры радиационного режима горных склонов, и не в том, что дано описание распределения тех или иных пород на склонах разных экспозиций, а в том, что во взаимосвязи анализируется растительность, генезис ее формирования как оптической системы и приход лучистой энергии как ведущий макро-, микроклиматический и физиологический фактор. Здесь следует обратить внимание читателя и на то, что автору удалось путем фитоактинометрических наблюдений показать существование определенных закономерностей формирования структуры растительного покрова на ценоотическом уровне.

Интересно заключение автора о том, что горным лесам присуща та же закономерность в характере взаимодействия радиации и растительности (в отношении ослабления ФАР), что и лесам равнинных территорий. Однако то, что ослабление ФАР в пологе горных лесов происходит также экспоненциально, не является неожиданным: такая закономерность, как известно, имеет место на самых разных уровнях структурной (архитектурной) организации растений. К сожалению, в книге нет достаточно глубокого биологического обобщения единства связей «радиация—структура растительного покрова», но этого и

нельзя было бы требовать от автора, поскольку повлекло бы за собой привлечение дополнительных материалов смежных с фитоактинометрией дисциплин, например ботаники, экологии, физиологии.

Лимитированный объем книги не позволил автору представить абсолютные значения параметров структуры пород — их общего и индивидуального листового индекса, диаметров крон, распределения площади листьев и радиации по глубине ценоза, что не только могло бы дать интересную информацию о древесных растениях исследованных зон, но и быть использовано для сопоставления с данными других территорий.

В целом же представляемая книга достаточно актуальна. Материалы ее имеют не только научный интерес в связи с оригинальностью и спецификой исследуемого объекта. Они должны также послужить обоснованием положения, что при лесопользовании и лесоразведении для сохранения ценных пород данного региона необходимо считаться с радиационным режимом как с одним из ведущих факторов на каждом конкретном склоне. Нет сомнений, что книга Н. Н. Выгодской будет с интересом встречена метеорологами, экологами, физиологами, лесоводами и специалистами по охране окружающей среды.

Ю. К. Росс, И. А. Шульгин

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КНИГЕ

- РП — растительный покров
 ИНТ — интегральная радиация
 ФАР — фотосинтетически активная радиация
 φ — географическая широта
 h_{\odot} — высота Солнца
 z_{\odot} — зенитный угол Солнца
 δ_{\odot} — склонение Солнца
 A_{\odot} — азимут Солнца
 p — коэффициент прозрачности атмосферы
 H — высота над уровнем моря
 A_c — азимут нормали склона
 B_c — крутизна склона
 S_0, S_d — плотность потока прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 S_0^*, S_d^* — плотность потока прямой солнечной радиации на наклонную поверхность при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 D_0, D_d — плотность потока рассеянной радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 D_0^*, D_d^* — плотность потока рассеянной радиации на наклонную поверхность при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 Q_0, Q_d — плотность потока суммарной радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 Q_0^*, Q_d^* — плотность потока суммарной радиации на наклонную поверхность при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 B_k — коротковолновый баланс
 B_x — длинноволновый баланс
 $B_{г.п}$ — радиационный баланс горизонтальной поверхности

- B^* — радиационный баланс наклонной поверхности
 K_s, K'_s — переходный коэффициент, равный отношению прямой радиации, поступающей на склон, к прямой радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 K_Q, K'_Q — переходный коэффициент, равный отношению суммарной радиации, поступающей на склон, к суммарной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, при безоблачном небе и действительных условиях облачности
 k — коэффициент пропускания прямой радиации облаками
 k' — коэффициент пропускания суммарной радиации облаками
 $\Delta \Sigma S', \Delta \Sigma Q$ — разности сумм прямой и суммарной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, между различными широтами
 $\Delta \Sigma S^*, \Delta \Sigma Q^*$ — разности сумм прямой и суммарной радиации, поступающей на наклонную поверхность между различными склонами
 σ^2/\bar{x} — относительная дисперсия
 I_s — индекс Морисита
 A — коэффициент агрегации Хопкинса
 L — относительная площадь листьев
 H_d — высота дерева
 $H_{кр}$ — вертикальная протяженность крон
 $V_{кр}$ — объем кроны
 $C_{п}$ — сомкнутость полога
 $C_{кр}$ — сомкнутость крон
 η — индекс перекрытия
 $a_{кр}$ — коэффициент ажурности крон
 $a_{п}$ — ажурность полога
 a_s — функция пропускания прямой солнечной радиации
 a_D — функция пропускания рассеянной радиации неба
 a_Q — функция пропускания суммарной радиации
 a'_Q — функция пропускания суммарной радиации по фактическим измерениям
 a'_D — функция пропускания рассеянной радиации по фактическим измерениям
 Π — функция поглощения радиации деятельным слоем ценоза
 $\Pi_{др}$ — функция поглощения радиации древостоем
 K — мера сопряженности
 K' — нормированная мера сопряженности

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная радиация является основным источником энергии большинства физических и химических природных процессов и единственным видом энергии, доступным и используемым фотоавтотрофными организмами в продукционном процессе. Исследованиями биологов доказана также роль радиации как регулятора фотоморфогенеза растений и их водно-теплового баланса. В связи с этим понятна актуальность изучения режима солнечной радиации в посевах и естественных фитоценозах для выявления путей повышения эффективности использования радиации растительностью как основы рационального управления растительными сообществами.

С другой стороны, поскольку лесная растительность занимает 33 % суши Земли [184], значительна ее роль в формировании радиационно-теплового баланса поверхности суши и соответственно в определении атмосферных процессов различного масштаба. При этом существуют определенные различия в закономерностях формирования физических процессов в приземном слое воздуха, лишенного растительности, и фитолимата в слое растительного покрова (РП).

В исследованиях энергообмена между РП и атмосферой следует выделять два аспекта проблемы: перенос радиации в земной атмосфере и перенос радиации в РП. Исследования первого направления характеризуют режим поступающей к верхней границе РП солнечной радиации, второго — трансформацию потоков радиации в РП при фиксированных условиях прихода радиации к верхней границе РП. Перенос радиации в земной атмосфере является предметом исследований классической актинометрии, перенос радиации в РП — фитоактинометрии. В последние 15—20 лет наблюдалось интенсивное развитие количественной фитоактинометрии в связи с возросшей актуальностью проблемы увеличения пищевых и сырьевых ресурсов планеты.

Хотя изучение светового режима в лесу и влияния радиации на рост и развитие сельскохозяйственных культур привлекают внимание биологов уже свыше ста лет, впервые физическая постановка задачи изучения переноса радиации в РП была сформулирована К. С. Шифриным в 1953 г. [173]. В этой работе РП рассматривался как мутная однородная рассеивающая среда. В том же году появилась работа японских ученых Монси и Саэки [240], положившая начало математическому моделированию радиационного режима РП. Дальнейшее развитие эти исследования получили в теоретических работах Аллена, Андерсона, Бунника, де Вита, Вильсона, Гейтца, Гудриана, Давидсона, Куроивы, Нормана, Мантиса, Миллера, Монси, Саэки и др. [179—181, 192, 208, 209, 212, 227—229, 238—243, 248, 252—257, 275, 280, 288—290, 295—297], а также эстонских физиков Ю. Росса, Х. Тооминга, Т. Нильсона и др. [114, 115, 136, 137, 154, 155, 158 и др.].

В свете современных теоретических представлений перенос радиации в РП определяется: 1) закономерностями распределения падающей на РП солнечной радиации; 2) оптическими свойствами РП; 3) структурой РП.

Поскольку ослабление прямой и рассеянной радиации в толще РП происходит не одинаково, необходимо раздельное изучение этих составляющих радиационного баланса. Кроме того, эффект воздействия солнечной радиации на жизнедеятельность растений зависит от спектрального состава приходящей радиации [174, 175 и др.]. Поэтому изучение режима радиации целесообразно в области ФАР (фотосинтетически активной радиации), используемой в процессе фотосинтеза, и общего интегрального потока коротковолновой радиации, ибо более 70 % из поглощенной ИНТ радиации превращается в тепло и расходуется в процессе транспирации и теплообмена. Так как процессы, происходящие в РП, зависят от интенсивности радиации, ее состава, продолжительности светового дня, высоты Солнца и т. п., то закономерности прихода радиации к верхней границе РП должны рассматриваться отдельно для различных географических районов.

В РП спектральный состав радиации существенно отличается от такового на открытом месте, что связано с селективным ослаблением радиации фитоэлементами. Так как листья эффективно поглощают радиацию в фотосинтетически активной области спектра (380—710 нм) и слабее в близкой инфракрасной области (710—1000 нм), то внутри РП радиационный поток значительно обедняется ФАР, причем особенности селективного поглощения зависят от видового состава РП [8, 10, 175, 192, 210, 274, 276, 277]. Этим определяется необходимость учета оптических свойств РП.

Взаимодействие приходящей радиации с растительностью осуществляется через слой РП. Поэтому радиационный режим

тесно связан со структурой РП и прежде всего с вертикальным профилем площади фитоэлементов, их размещением и пространственной ориентацией. Структура РП при фиксированных условиях прихода радиации определяет пространственно-временную изменчивость радиационного поля внутри растительности. Эта пестрота усугубляется изменением направления падающих солнечных лучей, которое зависит от высоты и азимута Солнца.

В центре внимания исследований переноса радиации стоит вопрос о роли структуры РП в определении радиационного режима.

Для большинства современных моделей радиационного режима характерно представление растительного покрова в виде горизонтально однородной среды, сформированной случайно расположенными малыми пластинами с заданными вертикальным распределением и ориентацией. Такое представление структуры является весьма приближенным и в лучшем случае соответствует однородным и густым посевам монокультур [137, 154, 179, 192, 194, 195, 212, 233, 241, 243, 295—297].

Для построения более сложных моделей радиационного режима лесных ценозов с неоднородной пространственной структурой необходима дополнительная информация о таких параметрах, как размещение фитоэлементов в пространстве и строение отдельных особей, слагающих ценоз [114, 136, 219, 225, 251—257 и др.]. В том или ином виде данные об этих параметрах содержатся в экологической и лесоводческой литературе, но редко рассматриваются в связи с особенностями радиационного режима РП. Отсутствие работ, в которых анализируются взаимосвязи между радиацией и комплексом параметров, характеризующих структуру ценоза, тормозит дальнейшее развитие теории переноса радиации в пространственно-неоднородном РП. В свою очередь отсутствие хорошей теории обуславливает достаточно низкий уровень массовых экспериментальных фитоактинометрических исследований, что не позволяет перейти к интегрированию накопленной информации и построению эколого-географических моделей.

Большая работа по обобщению экспериментальных фитоактинометрических данных была проделана В. А. Алексеевым [10], который провел инвентаризацию основных типов леса равнинных территорий страны по световому режиму. Несомненно, что значение этой работы гораздо шире, ибо в ней рассматриваются и причинно-следственные связи между световым режимом, элементами структуры, фотосинтезом и продуктивностью древостоев. Ю. Л. Раунер [133] расширил круг вопросов за счет рассмотрения особенностей энерго- и массообмена между лесной растительностью и приземным слоем атмосферы. Но, в отличие от Алексеева, Раунер проводит анализ на ограниченном числе объектов. Отдельные вопросы радиационного режима леса в области ФАР освещены в монографиях

Ю. Д. Цельникер [163, 164], но несколько в ином ключе в связи с экспериментальным изучением фотосинтеза, газообмена и теневыносливости некоторых древесных пород. Во всех перечисленных работах основное внимание уделяется равнинным лесам.

Для горных лесов сведения об их радиационном режиме в мировой литературе весьма ограничены. В силу различий в методиках измерений практически невозможно провести сравнение имеющихся данных как между собой, так и с данными для равнинных лесов. Объясняется это тем, что горные леса являются наиболее сложным вариантом фитоценозов. Помимо чисто технических трудностей процесса измерений (особенно в труднодоступных местообитаниях), при изучении радиационного режима горных лесов возникают сложности при определении прихода радиации к верхней границе РП в мозаичных условиях горного рельефа. Зачастую трудно расчлнить собственно влияние рельефа и структуры РП на радиационный режим фитоценоза.

В то же время в связи с интенсивным освоением горных территорий информация о радиационном режиме горных лесов крайне необходима для разумного планирования хозяйственных мероприятий и рационального использования природных ресурсов. При этом следует учесть, что лес в горах — это не только мощная сырьевая база запасов древесины, но и природный щит, защищающий поверхность склонов от эрозии, гарантия сохранения водного режима многих рек, истоки которых находятся в горах.

Эксплуатация лесных массивов, вынужденное сокращение лесопокрываемой площади в районах интенсивного хозяйственного освоения и т. п. приводят как к смене коренных типов леса (образованных хозяйственно ценными породами) производными малоценными лесами, так и к кардинальному изменению водно-теплового баланса поверхности склонов и нарушению экологического равновесия горных биогеосистем в целом. Поэтому в настоящее время увеличение сырьевых ресурсов нельзя рассматривать как единственную цель эксплуатации лесных массивов. Все более актуальным становится вопрос о сохранении и восстановлении коренных типов леса, особенно в горных районах, где велико водоохранное и противоэрозионное значение леса. А в арсенале современного лесоводства практически нет других активных мер воздействия на лесные фитоценозы кроме целенаправленной регуляции радиационного режима через различного типа рубки. Поэтому изучение радиационного режима горных лесов, как и других лесных сообществ, имеет большое практическое значение.

Несмотря на то что в настоящей монографии приводятся в основном экспериментальные фитоактинометрические данные для горных лесов, она может быть полезна для специалистов в области теории переноса радиации в РП, так как в ней

содержится информация о пространственной структуре РП. В практическом отношении она представляет интерес для специалистов в области лесного, сельского хозяйства, строительства, гелиотехники и др., так как в книге приведены конкретные материалы о радиационном режиме горных районов Дальнего Востока, Южной Сибири и Средней Азии.

В монографии в основном использованы результаты полевых измерений в горных районах за 1973—1976 гг. Пользуясь случаем, автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность за большую помощь в сборе и обработке первичных данных бывшим студентам Московского и Дальневосточного государственных университетов, Московского лесотехнического института А. Н. Виноградову, И. И. Зайцевой, Н. В. Зукерт, Г. А. Кудимовой, М. Г. Лебедевой, Н. А. Локтевой, Г. И. Луниной, В. В. Немченко, Е. А. Садовничей, Л. В. Созинову, В. С. Скулкину, Н. М. Чебаковой, Е. В. Шерман и др., многие из которых в настоящее время успешно работают в области фитоактинометрии. Автор благодарен также своим непосредственным коллегам А. В. Высоцкому, Е. И. Голубевой, О. Г. Денисенко, Н. В. Красниковой, Т. А. Милешиной, В. П. Некрасову, И. В. Серовой, С. Н. Трудневой и др. Автор выражает благодарность за поддержку настоящей работы и весьма полезные дискуссии по ряду рассмотренных в книге вопросов В. А. Алексееву, Т. А. Нильсону, Ю. Г. Пузаченко, Ю. К. Россу, Ю. Г. Симонову, Х. Г. Тоомингу, Т. Э. Фрею, Ю. Л. Цельникер и И. А. Шульгину.

Глава I

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИХОДА РАДИАЦИИ К ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ ГОРНОГО РЕЛЬЕФА

I.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Приход радиации к верхней границе РП тождествен приходу радиации к подстилающей поверхности открытых местообитаний. Общим закономерностям радиационного режима открытых территорий посвящено много публикаций. Только за последние годы вышло несколько монографий, в которых рассматривается режим радиации на территории СССР [15—17, 22, 29, 30, 91, 93, 121, 132, 141, 166, 172 и др.]. Различные аспекты взаимодействия радиации и растений освещены в монографиях В. А. Алексеева, Н. А. Ефимовой, Ю. Л. Раунера, Н. И. Руднева, Ю. К. Росса, Х. Г. Тооминга, Ю. Л. Цельникер и И. А. Шульгина [10, 74, 133, 137, 140, 154, 163, 164, 174, 175]. Эти работы, а также обширная справочная литература Госкомгидромета СССР дают достаточно полное представление о приходе радиации к верхней границе равнинных лесов.

В то же время задача количественной оценки прихода радиации к РП в горных условиях значительно сложнее. Это связано прежде всего с недостаточным количеством материалов наблюдений из-за редкой сети актинометрических станций в горных районах. Кроме того, результаты непосредственных измерений над лесом или на близрасположенном участке открытого склона той же крутизны и экспозиции репрезентативны только для конкретной точки. Их пространственная интерполяция затруднена по целому ряду причин и прежде всего из-за различий в закрытости горизонта. Поэтому при исследовании радиационного режима горных районов используются преимущественно расчетные методы.

В нашей стране работы по изучению прихода радиации на наклонные поверхности были начаты в 30-х годах М. С. Аверкиевым [4]. К настоящему времени опубликовано много теоретических и экспериментальных исследований, табличных материалов для разных широт [5, 6, 18—21, 27, 43, 66, 77, 92, 108, 177, 191, 207, 214—216, 230, 231, 271, 282]. Часть этих данных обобщена в монографии [93]. Однако наличие обширной

информации о радиационном режиме наклонных поверхностей не снижает актуальности продолжения этих исследований в различных регионах. Это объясняется, во-первых, тем, что возможны значительные внутриширотные изменения полученных отношений в силу региональных особенностей режима облачности и условий прозрачности атмосферы; во-вторых, при фитоактинометрических исследованиях зачастую требуется более детальная информация (например, суточный ход радиации и т. п.) по сравнению с той, которая имеется в литературе для какой-либо широты.

С целью сопоставления полученных нами результатов с литературными данными для соответствующих широт ниже излагается методика, которая применялась для расчета прямой и суммарной радиации.

В этой главе и далее для выражения плотности потока (интенсивности) радиации используются традиционные единицы — кал/(см²·мин), которые связаны с Международной системой единиц (СИ) следующим образом:

$$1 \text{ кал/см}^2 = 697,8 \text{ Вт/м}^2, \quad 1 \text{ Вт/м}^2 = 0,00143 \text{ кал/см}^2.$$

Для сумм радиации за какой-либо промежуток времени:

$$1 \text{ кал/см}^2 = 4,1868 \text{ Дж/см}^2 = 41,868 \text{ Дж/м}^2 = 11,63 \text{ Вт/м}^2,$$

$$1 \text{ ккал/см}^2 = 4,19 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^2 = 41,9 \text{ Мдж/м}^2.$$

1.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЯМОЙ И СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ НА ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

1.2.1. Прямая радиация при безоблачном небе

Расчет прямой радиации при безоблачном небе для поверхностей произвольной ориентации и крутизны проводился по формуле

$$S_0 = I_0 \rho^m \cos \alpha \sum_{i=1}^q \Delta t_i, \quad (1)$$

где S — сумма прямой радиации за 1 ч, q — число интервалов разбивки часа, Δt_i — интервал, в мин, I_0 — солнечная постоянная, ρ — коэффициент прозрачности атмосферы, m — относительная масса атмосферы, $\cos \alpha$ — косинус угла падения солнечных лучей на заданную поверхность, причем

$$\cos \alpha = \cos B_c \cos z_\odot + \sin B_c \sin z_\odot \cos (A_\odot - A_c), \quad (2)$$

где B_c — угол наклона поверхности, z_\odot — зенитное расстояние Солнца, A_\odot — азимут Солнца, A_c — азимут проекции нормали к склону на горизонтальную поверхность.

Формула (2) в различных модификациях используется практически во всех расчетных схемах при определении прямой радиации на наклонную поверхность. Оптическая масса в (1) определялась для значений z_\odot менее 70°:

$$m = 1/\cos z_\odot. \quad (3)$$

При больших значениях z_\odot величина m находилась путем линейной интерполяции из таблицы Бемпорада; I_0 определялось по таблице, приведенной в работе [216], в зависимости от склонения Солнца δ_\odot . При этом величина I_0 изменялась в пределах 2,07—1,94 кал/(см²·мин).

Расчеты S_0 по формуле (1) были проведены по программе, составленной И. М. Зейдисом и В. П. Некрасовым для ЭВМ МИР-2 [78]. Эта программа является модификацией двух программ, предложенных Фагглом [216] для расчета часовых и дневных сумм S_0 . Часовые суммы определялись путем интегрирования по методу прямоугольников для $\Delta t_i = 20$ мин и $q = 3$. Ошибка расчета

$$R_q = [(b - a)^3 / 24q^2] f''(\xi), \quad (4)$$

где $a \leq \xi \leq b$ — переменная интегрирования в пределах

$$f(t_i) = I_0 \rho^m \cos \alpha(t_i), \quad (5)$$

не превышает 0,05 кал/(см²·ч) [78] (т. е. менее 0,5—1,0 % от $\sum S_0$ за 1 ч и не более 2—4 % от $\sum S_0$ за день). В модифицированном варианте программы введено также определение времени восхода (ТВ) и захода (ТЗ) Солнца.

Дополнительное разбиение неполных часов от ТВ до ТЗ на q интервалов обеспечило более точное определение $\sum S_0$ при восходе и заходе Солнца. Введение для середины каждого часового интервала величины $\cos z_\odot$ позволило устранить занижение дополуденных и завышение послеполуденных $\sum S_0$, характерное для расчетной схемы Фаггла. Кроме того, в [78] средние дневные $\sum S_0$ определяются не на 15-е число месяца (как это обычно делается при подобных расчетах), а для средних за месяц величин δ_\odot .

По формуле (1) расчет часовых, дневных и месячных сумм S_0 был выполнен для поверхностей, крутизна которых задавалась значениями B_c : 0, 10, 20, 30 и 40°, а азимут склона A_c составлял 0, 45, 90, 135 и 180°. Для каждого сочетания B_c и A_c суммы S_0 определялись при коэффициентах прозрачности атмосферы, равных 0,65, 0,70, 0,75, 0,80 и 0,85. При этом допускалось, что ρ остается постоянным в течение дня [43].

Основной массив расчетных данных был получен за период май—сентябрь для широт 41,5, 44,3 и 52,7°. Эти значения ϕ соответствуют средним широтам рассматриваемых ниже горных районов: Юго-Западного Тянь-Шаня, Среднего Сихотэ-Алиня и

Западного Саяна. Для $\varphi=44,3^\circ$ $\sum S_0$ были определены за весь год. Полные таблицы $\sum S_0$ за различные интервалы для поверхностей произвольной ориентации опубликованы в [52].

Дополнительно были рассчитаны часовые и дневные $\sum S_0$ для значений p при относительной массе атмосферы, равной 2 (p_2). Это делалось прежде всего для проверки точности использованной нами расчетной схемы, так как в справочной литературе в основном содержатся данные о средних многолетних значениях p_2 .

Результаты сравнения расчетных $\sum S'_{0p}$ (за день и месяц) и фактических средних многолетних $\sum S_{0ф}$ при ясном небе для нескольких актинометрических станций показали, что расхождение между $\sum S_{0ф}$ и $\sum S'_{0p}$ мало зависит от того, в каком виде в (1) учитывается p (табл. 1). Относительная разность в оцен-

Таблица 1

Сравнение расчетных $\sum S'_{0p}$ и средних многолетних фактических $\sum S_{0ф}$ сумм прямой радиации при ясном небе (кал/(см²·день)). Ташкент, горизонтальная поверхность

Характеристика	V	VI	VII	VIII	IX
p_2 по [151]	0,71	0,72	0,71	0,72	0,71
$\sum S'_{0ф}$ по [151]	571	613	584	527	400
1. $\sum S'_{0p}$ по [121]	588	614	572	522	425
2. $\sum S'_{0p}$ по (1), приведенные к $m=2$	564	600	578	529	419
3. $\sum S'_{0p}$ по (1), не приведенные к $m=2$	574	623	594	527	403

Отношения, %

$(\sum S'_{0p_2} - \sum S'_{0ф}) / \sum S'_{0ф}$	-1,2	-2,2	-1,0	-0,4	4,8
$(\sum S'_{0p_2} - \sum S'_{0p_1}) / \sum S'_{0p_1}$	-3,7	-2,3	1,0	1,3	-1,4
$(\sum S'_{0p_2} - \sum S'_{0ф}) / \sum S'_{0ф}$	0,5	1,6	1,7	0,0	0,8
$(\sum S'_{0p_2} - \sum S'_{0p_1}) / \sum S'_{0p_1}$	-2,4	1,5	3,8	1,0	-5,2
$(\sum S'_{0p_1} - \sum S'_{0p_2}) / \sum S'_{0ф}$	-1,8	-3,8	-2,7	0,4	4,0

Примечание. Индексы 1, 2 и 3 соответствуют приведенным выше $\sum S'_{0p}$.

ках $\sum S'_{0p}$ за день, приведенных к $m=2$, и при постоянной величине p , но с учетом изменения m в течение дня, для Ташкента не превышает 4%, для Новосельской 2,4—3,0% и т. д. Знак этой разности меняется в зависимости от средней за день h_0 (или m).

Незначительные расхождения в дневных и месячных $\sum S'_{0p}$, вычисленных при различных вариантах m , объясняются тем, что в умеренных широтах среднее за день значение m близко к 2. Очевидно, что в более южных районах дневные $\sum S'_{0p}$, приведенные к $m=2$, будут ниже $\sum S'_{0p}$, полученных при учете изменяющихся в течение дня значений m , а в более северных — выше (рис. 1). Аналогичная тенденция сохраняется и при сравнении летних и зимних месяцев на одной ф.

Несомненно, что в течение дня часовые $\sum S'_{0p}$, приведенные к $m=2$ (рис. 2) и не приведенные, различаются более существенно (табл. 2).

В зависимости от конкретных задач можно использовать различные подходы к учету m в формуле (1). Как было показано на примере ст. Ташкент (см. также результаты сравнения для других станций в [43, 125]), средние многолетние $\sum S'_{0p}$ за день и месяц практически можно оценивать путем интерполяции данных, полученных для $p=\text{const}$ в течение дня [52]. В этом случае реальность расчетных данных будет зависеть от точности вводимых коэффициентов прозрачности. В наших исследованиях, помимо различного рода справочных данных, использовались значения p , которые находились с помощью обычной процедуры приведения 3—4-летних наблюдений к многолетним рядам по ближайшим актинометрическим станциям. Так, например, были получены следующие средние многолетние значения p_2 при ясном небе для ст. Оленья Речка (Западный Саян) после приведения их к длиннорядной ст. Кызыл [143]:

	Июнь	Июль	Август
Кызыл	0,76	0,75	0,77
Оленья Речка	0,78	0,77	0,80

Если при анализе использовались часовые $\sum S'_{0p}$ (соответствующие средним многолетним условиям в исследуемом районе), то они определялись через значения p , полученные либо путем обработки средних многолетних данных актинометрических наблюдений [151], либо путем осреднения данных, опубликованных в ежемесячниках за 1966—1975 гг.¹, а также данных

¹ В основном использовались данные следующих станций: Новосельская, Приморская, Рудная Пристань (Приморский край), Кызыл, Хакасская (Южная Сибирь), Алма-Ата, Кызылча, Ташкент, Тянь-Шань, Фрунзе (Средняя Азия).

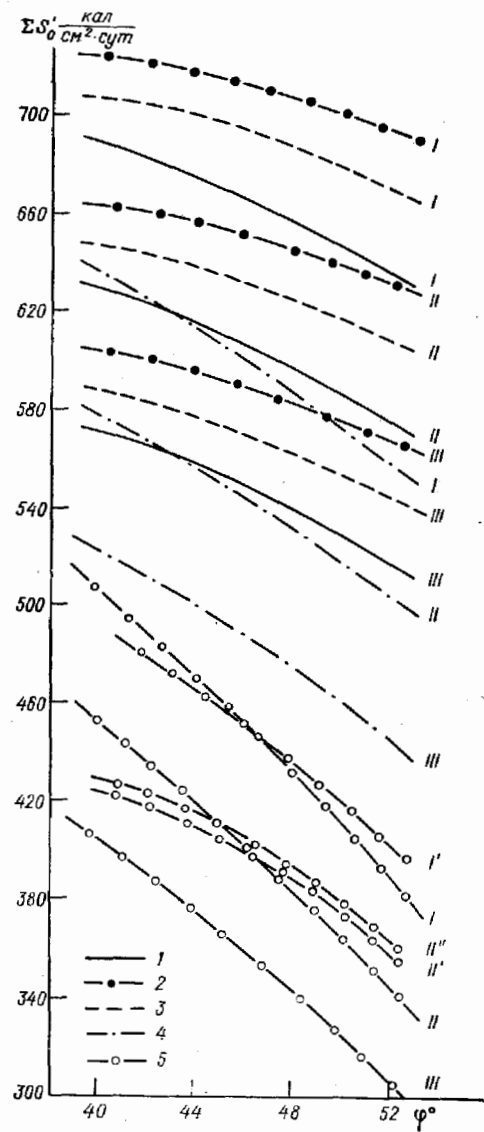


Рис. 1. Изменение сумм прямой радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе в зависимости от широты и прозрачности атмосферы.

1 — май, 2 — июнь, 3 — июль, 4 — август, 5 — сентябрь; I) $p=0,80$, II) $p=0,75$, III) $p=0,70$, I', II', III') для p_2 ; II'') по данным [121].

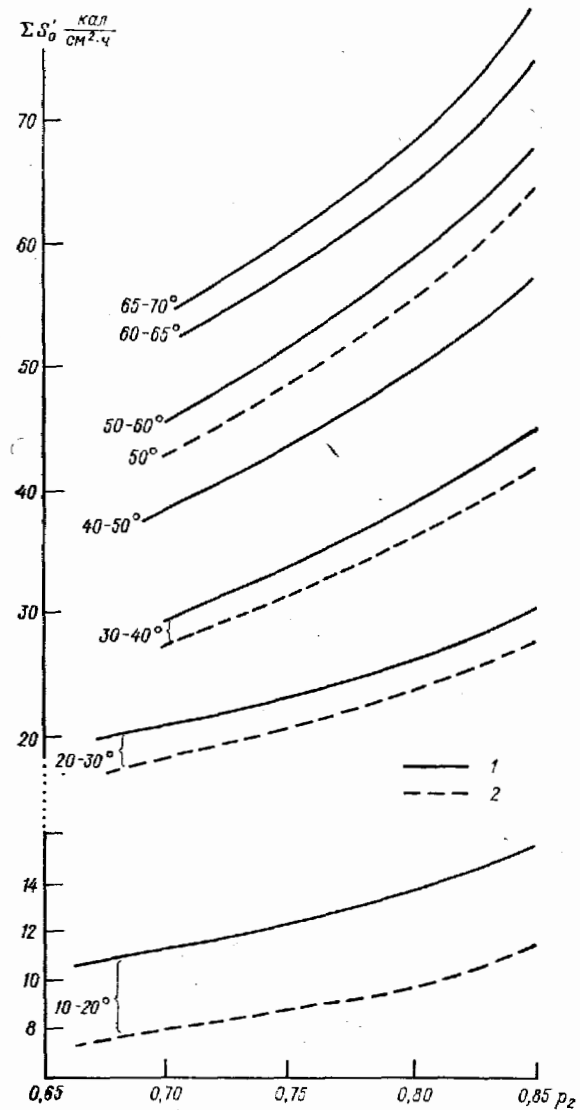


Рис. 2. Изменение часовых $\Sigma S_0'$ на $\varphi=44^\circ$ в зависимости от p_2 при различных высотах Солнца в июне (1) и сентябре (2).

Цифры у кривых — высота Солнца.

Часовые суммы прямой радиации (кал/(см²·ч)) на горизонтальной поверхности при ясном небе, рассчитанные при $m = 2$ (1) и с учетом изменения относительной массы атмосферы в течение дня (2)

Месяц, склонение Солнца	Р	Вариант учета m	Ширина 41°												$\sum S_0'$ кал/(см ² ·день)
			3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12				
Июнь, $\delta_{\odot} = 23^{\circ}$	0,85	1		1,5	14,1	29,3	43,9	57,0	67,7	75,3	79,2	736,0			
		2	0,1	7,7	25,4	44,5	62,1	76,5	86,8	92,1	790,6				
Сентябрь, $\delta_{\odot} = 3,2^{\circ}$	0,85	1		0,3	11,6	27,9	42,5	54,4	62,8	67,2	533,2				
		2	0,0	0,0	5,3	23,3	42,3	58,2	69,5	75,5	548,0				
Июнь, $\delta_{\odot} = 23^{\circ}$	0,70	1	0,2	5,6	13,6	21,9	29,9	37,0	42,9	47,0	49,2	594,6			
		2	0,0	0,5	6,2	17,6	30,9	43,7	54,5	62,3	66,4	564,2			
Сентябрь, $\delta_{\odot} = 3,2^{\circ}$	0,70	1		0,4	7,2	16,1	24,1	30,6	35,2	37,6	302,4				
		2		0,0	1,2	8,9	20,7	31,6	39,7	44,1	292,5				

собственных наблюдений. Расхождение между измеренными и рассчитанными по (1) средними за 1 ч интенсивностями S_0 не превышают 2—5% [78, 125].

Переход от $\sum S_0$ за различные интервалы времени к $\sum S_0^*$ — суммам прямой радиации на наклонные поверхности — осуществлялся преимущественно на основе интерполяции данных таблиц [43, 52] в зависимости от p . С этой же целью можно использовать и коэффициенты перехода $K_s = \sum S_0^* / \sum S_0$, значения которых практически не зависят от p . Метод определения $\sum S^*$

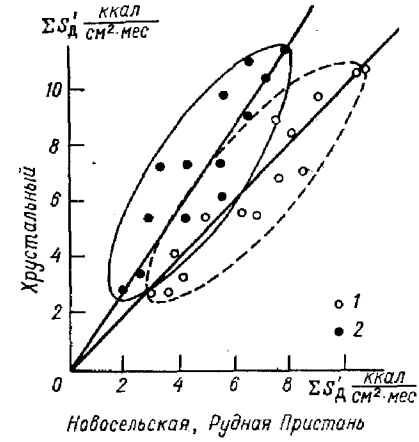


Рис. 3. График связи между месячными $\sum S_d'$, полученными по измерениям в пос. Хрустальный и на станциях Новосельская (1) и Рудная Пристань (2).

Для пос. Хрустальный $\sum S_d'$ получены на основе регистрации суммарной и рассеянной радиации в течение 1973—1975 гг.

при различных условиях облачности через K_s применялся нами при оценках сумм радиации за конкретные годы, для конкретных склонов или (как более простой способ по сравнению с расчетом через p_2) при нахождении средних многолетних $\sum S^*$ для районов, не обеспеченных сетевыми наблюдениями, после приведения результатов собственных наблюдений за несколько лет к данным ближайших актинометрических станций (рис. 3).

Следует подчеркнуть, что суммы радиации, которые будут рассматриваться ниже, в основном получены без учета закрытости горизонта. Последний фактор учитывался только при крупномасштабных исследованиях, когда в анализе использовались данные о поступлении радиации к поверхности склона в какой-либо горной долине. С этой целью на каждом склоне с помощью теодолита снималась диаграмма закрытости горизонта и на ее основе определялось сокращение сумм радиации за счет изменения ТВ и ТЗ.

При более детальных исследованиях для отдельных районов на основе топографических и специальных морфометрических крупномасштабных карт определялась средняя закрытость горизонта. Так, например, в условиях Среднего Сихотэ-Алиня

средняя закрытость горизонта по всем азимутам составляет 25° (неопубликованные данные Т. Ю. Симоновой). В этом случае максимально возможное сокращение $\sum S^*$ за летний период на северных крутых склонах составляет 12 %, а минимальное на южных крутых 2,5—3,0 % [125]. Очевидно, что на одной ф влияние закрытости горизонта резко возрастает с уменьшением δ_{\odot} . Так, в период ноябрь—январь в условиях Среднего Сихотэ-Алиня при закрытости горизонта 25° $\sum S^*$ могут снижаться на склонах всех ориентаций более чем на 90 %; в феврале и октябре на северных склонах крутизной 20—30° — на 15 %, южных склонах крутизной 30—40° — на 28—30 % и т. д.

Теоретически сокращение $\sum S^*$ за счет закрытости горизонта должно проявляться более сильно по мере увеличения широты. Но определяющим фактором в этом случае является характер расчлененности рельефа, который связан с геологическим строением горной системы. Например, в молодой горной системе Тянь-Шаня из-за сильно выраженной расчлененности рельефа потери в суммах радиации в среднегорной зоне на северных склонах крутизной 20° достигают в летний период 17 %, на юго-западных (20°) — 22 % (оценено нами по [101]). Для Западного Саяна при круговой закрытости горизонта около 20° сокращение $\sum S^*$ летом для долины, ориентированных с юга на север, составляет всего 2—3 %, с запада на восток и с юго-запада на северо-восток — не более 4 % [143].

Для того чтобы учесть влияние закрытости горизонта при построении климатологических карт, необходимо в дальнейшем создать базисные морфометрические карты разного масштаба для различных горных районов. Пока таких карт не существует, закрытость горизонта можно учитывать только для конкретных небольших территорий [125] или ориентировочно при оценке возможных сокращений $\sum S^*$, полученных для полубесконечного склона.

1.2.2. Суммарная радиация при безоблачном небе

Для горизонтальной поверхности суммарная радиация равна

$$Q_0 = S'_0 + D_0, \quad (6)$$

где D_0 — поток рассеянной радиации на горизонтальной поверхности при безоблачном небе. Так как при точном расчете D_0 необходимо учитывать влияние многих факторов (h_{\odot} , ρ , углового распределения рассеянной радиации по небосводу, альbedo подстилающей поверхности), то обычно на практике D_0 вычисляют по данным наблюдений при безоблачном небе. Последний метод мы использовали для расчета средних за месяц суточных $\sum D_0$. При этом фактические $\sum D_0$ брались из справочных данных для близлежащих станций или вычислялись по данным

собственных наблюдений. Для горизонтальной поверхности максимальное расхождение между расчетными и фактическими $\sum Q_0$ не превышало 6—8 % (табл. 3).

Таблица 3

Расчетные $\sum Q_{0p}$ и фактические $\sum Q_{0ф}$ суммы суммарной радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе и среднем многолетнем значении ρ_2 . Ст. Новосельская, $\varphi = 44^\circ$

Характеристика	I	II	III	IV	V
ρ_2	0,80	0,80	0,75	0,75	0,75
$\sum Q_{0ф}$ ккал/(см ² · мес)	6,4	8,9	14,2	17,9	21,2
$\sum Q_{0p}$ ккал/(см ² · мес)	5,5	9,1	13,8	18,5	22,9
$(\sum Q_{0p} - \sum Q_{0ф})/\sum Q_{0ф} \%$	1,6	2,2	-2,8	3,3	8,0

Характеристика	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
ρ_2	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80
$\sum Q_{0ф}$ ккал/(см ² · мес)	21,9	21,7	18,8	15,0	10,9	7,0	5,5
$\sum Q_{0p}$ ккал/(см ² · мес)	21,4	20,9	17,9	14,7	10,2	6,9	5,3
$(\sum Q_{0p} - \sum Q_{0ф})/\sum Q_{0ф} \%$	-2,3	-3,7	-4,8	-2,0	-6,4	-1,4	-3,6

Поток рассеянной радиации на наклонную поверхность формируется за счет рассеянной радиации неба и дополнительного потока, обусловленного многократным рассеянием в пределах горной долины. Для полубесконечного склона дополнительный поток формируется из отраженного от горизонтальной поверхности перед склоном. Величина суммарного диффузного потока во многом зависит от угловой структуры полей рассеянной радиации неба и отраженной радиации. При изотропном приближении первая составляющая для склона может быть определена как

$$D_0^* = D_0 \cos^2 B_c / 2, \quad (7)$$

вторая составляющая как

$$R_0^* = R_0 \sin^2 B_c / 2, \quad (8)$$

где D_0 и R_0 — соответственно рассеянная радиация на горизонтальной поверхности и отраженная от горизонтальной

поверхности перед склоном [5, 6, 18, 19, 93 и др.]. Отсюда суммарный поток на наклонную поверхность равен

$$Q_0^* = S_0^* + D_0 \cos^2 B_c/2 + R_0 \sin^2 B_c/2. \quad (9)$$

Результаты экспериментальных наблюдений и расчетов D_0^* и R_0^* с учетом углового распределения показали, что изотропное приближение при расчете $\sum Q_0^*$ в случае преобладания S_0^* или для условий сплошной облачности дает лучшие результаты, чем при расчете интенсивности Q_0^* . Согласно работам [18, 19], суточная $\sum (D_0^* + R_0^*)$ для склонов крутизной не более 30—40° равна $\sum D_0$. Это равенство справедливо в основном для летнего периода, когда альbedo менее 0,30. Исходя из этого для приближенных оценок $\sum Q_0^*$ можно использовать формулу

$$\sum Q_0^* = \sum S_0^* + \sum D_0 \quad (10)$$

при $B_c \leq 30^\circ$ [18, 19, 93].

Для случая, когда $S_0^* \gg D_0^*$, в работе [93] предлагается использовать для приближенных расчетов суточных $\sum Q_0^*$ коэффициент K_s :

$$\sum Q_0^* = \sum Q_0 K_s. \quad (11)$$

В наших работах суточные $\sum Q_0^*$ для летнего периода вычислялись по формуле

$$\sum Q_0^* = \sum S_0^* + \sum D_0 \cos^2 B_c/2. \quad (12)$$

При этом составляющая R_0^* не учитывалась, так как при $B_c \leq 40^\circ$ ее вклад по сравнению с другими составляющими незначительно мал [5, 93].

При расчетах $\sum Q_0^*$ за зимний период, когда альbedo подстилающей поверхности возрастает, использовалась формула (9).

Сравнение результатов расчета по формулам (10)—(12) показало, что в целом значения коэффициентов перехода $K_Q = \sum Q_0^* / \sum Q_0$ для сумм за день или месяц примерно одинаковы и мало зависят от формы учета рассеянных потоков (табл. 4). Использование K_s для суммарной радиации приводит к более существенным различиям, возрастающим по мере увеличения доли рассеянной радиации. Расхождения в величинах K_Q , полученных нами и опубликованных в литературе, возможно, обусловлены различиями в оценках $\sum Q_0$ за разные периоды осреднения. Так, например, по ст. Тянь-Шань в работе [27] $\sum Q_0$ получены по данным за 1958—1960 гг., в наших же расчетах использованы осредненные данные ежемесячников за 1966—1975 гг. и т. п.

Таблица 4

Коэффициенты K_Q для определения суточных сумм суммарной радиации при безоблачном небе (крутизна склонов 30°). Средняя Азия, $\varphi = 41^\circ$

Вариант	Южный склон				Северный склон				Восточный склон						
	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX
Кызылца															
1	1,06	0,98	1,02	1,09	1,21	0,70	0,74	0,70	0,68	0,55	0,93	0,92	0,93	0,94	0,96
2	1,00	0,94	0,98	1,08	1,19	0,78	0,81	0,81	0,70	0,56	0,92	0,90	0,92	0,95	0,95
3	1,00	0,94	0,98	1,09	1,25	0,79	0,82	0,82	0,72	0,57	0,93	0,91	0,93	0,96	0,96
4	1,00	0,94	0,97	1,07	1,24	0,76	0,80	0,78	0,67	0,49	0,91	0,90	0,90	0,91	0,91
Тянь-Шань															
1	0,97	0,96	0,96	1,04	1,15	0,78	0,86	0,84	0,75	0,59	0,95	0,93	0,94	0,93	0,94
2	1,00	0,95	0,99	1,07	1,23	0,77	0,83	0,80	0,70	0,55	0,91	0,92	0,91	0,92	0,93
3	1,01	0,95	0,97	1,07	1,21	0,77	0,82	0,79	0,70	0,56	0,91	0,93	0,92	0,92	0,93
4	1,00	0,93	0,95	1,06	1,23	0,76	0,81	0,78	0,68	0,49	0,91	0,90	0,90	0,90	0,91

Примечание. Получено: 1 — для Кызылца по [121], для Тянь-Шаня по [27]; 2 — $K_Q = \sum Q_0^* / \sum Q_0$ при $\sum Q_0^* = \sum S_0^* + \sum D_0 \cos^2 B_c/2$; 3 — $K_Q = \sum Q_0^* / \sum Q_0$ при $\sum Q_0^* = \sum S_0^* + \sum D_0$; 4 — $K_Q = K_s$.

1.3. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГРАДИЕНТЫ ВОЗМОЖНЫХ СУММ РАДИАЦИИ

Из-за редкой в горах сети станций градиенты $\Sigma S_0'$ и ΣQ_0 приходится находить, объединяя актинометрические данные станций одного региона. Эти станции могут быть расположены не только на различных высотах, но и на различном удалении друг от друга по широте. Так, для Средней Азии объединяются станции в интервале φ от 38 до 43° . Однако из рис. 1 видно, что при $p = \text{const}$ широтный градиент $\Sigma S_0'$ в этом диапазоне

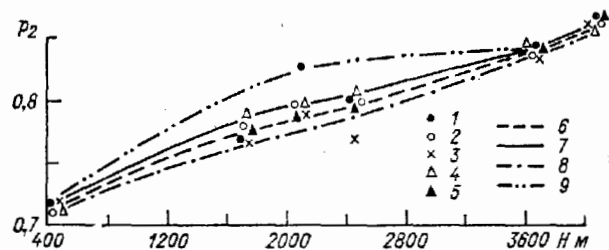


Рис. 4. Изменение прозрачности атмосферы в зависимости от высоты над уровнем моря, по данным [121].

1 — май, 2 — июнь, 3 — июль, 4 — август, 5 — сентябрь, 6 — май, сентябрь, 7 — июнь, август, 8 — июль, 9 — май для $\varphi = 41^\circ$.

изменяется от $2-3$ кал/(см²·сут) на 1° (при $\delta_\odot = 21 \div 23^\circ$) до $6-8$ кал/(см²·сут) на 1° (при $\delta_\odot = 14 \div 3^\circ$). Подобные изменения соизмеримы с величиной вертикального градиента при поднятии на 100 м.

Чтобы снять влияние φ , мы приводили $\Sigma S_0'$ к одной широте. Для этого были построены вертикальные профили p_2 по средним многолетним данным [121, 151]. Пример такого графика показан на рис. 4. Допуская, что при $\Delta\varphi \leq 3^\circ$ p и p_2 практически не зависят от φ , через функции $p_2 = f(H)$ и $\Sigma S_0' = f(p_2)$ мы находили $\Sigma S_0'$ на различных высотах при $\varphi = \text{const}$ (табл. 5). Расхождения в определении $\Sigma S_0'$ при использовании уточненных значений вертикальных градиентов по сравнению с фактическими сетевыми данными составляют $0,5-4,8\%$. Использование средних градиентов, предложенных И. И. Борзенковой [26, 27] для Кавказа и Средней Азии, дает расхождение для $\Sigma S_0'$ порядка $1,2-13\%$.

Максимальные различия в $\Sigma S_0'$, найденных при различных градиентах, соизмеримы с изменением $\Sigma S_0'$ при $\Delta\varphi = 5 \div 6^\circ$.

Таблица 5

Вертикальные градиенты $\Sigma S_0'$ в горах Средней Азии для $\varphi = 41^\circ$ (кал/(см²·сут) на 100 м)

H м	Вариант	V	VI	VII	VIII	IX
500—1500	1	7,90	8,00	4,50	5,00	5,00
	2	6,20	4,40	7,70	3,70	5,30
1500—2000	1	11,00	7,00	12,60	8,00	7,00
		13,80	6,80	4,00	6,00	3,20
2000—3500	1	3,67	5,27	4,67	5,13	2,86
	2	1,21	2,93	3,83	3,83	2,93
	3	1,01	1,95	3,03	4,44	3,52
500—2000	1	8,93	7,66	7,20	6,00	5,67
	2	8,73	6,67	5,46	4,47	4,60
	3	8,54	7,09	5,85	5,21	3,23

Примечание. 1 — по данным И. И. Борзенковой [26] для Кавказа и Средней Азии, 2 — наши данные, 3 — по фактическим средним многолетним данным для ст. Ташкент—Кызылча и Кызылча—Тянь-Шань [151].

Для Западного Саяна вертикальные градиенты $\Sigma S_0'$ были рассчитаны Е. И. Садовничей [143] после приведения данных наблюдений за три года на различных высотах к многолетнему ряду наблюдений на ст. Кызыл (со стороны южного макросклона) и ст. Хакасская (со стороны северного макросклона). При их расчете влияние $\Delta\varphi$ (порядка $3-4^\circ$) не снималось (табл. 6).

Таблица 6

Вертикальные градиенты $\Sigma S_0'$ для Западного и Восточного Саяна (кал/(см²·сут) на 100 м)

Территория	H м	V	VI	VII	VIII	IX	
Западный Саян [143]	южный макросклон	600—1400	4,52	5,00	4,84	5,81	5,67
	северный макросклон	300—1400	7,74	7,00	7,10	7,42	7,33
Восточный Саян [121]			3,50	3,75	3,75	3,55	2,40

Как следует из табл. 6, вертикальные градиенты $\Sigma S_0'$ превышают градиенты, которые возможны при региональных изменениях p с высотой в горах Восточной Сибири и Алтая. Так, согласно [121], вертикальный градиент p_2 на 1000 м поднятия в среднем за лето для Восточной Сибири равен $0,02$; для

Алтая—0,03—0,04. Отсюда возможные градиенты $\sum S'_0$ (см. рис. 1) соответственно равны 3,0—4,3 кал/(см²·сут) на 100 м. Эти оценки близки к приведенным в табл. 6 градиентам для Восточного Саяна, полученным З. И. Пивоваровой [121].

Увеличение градиентов $\sum S'_0$ в Западном Саяне связано как с нерепрезентативностью низинных степных станций, так и вообще с региональными особенностями изменения состояния атмосферы. Даже если предположить, что градиент для северного макросклона сильно завышен из-за низкой прозрачности атмосферы в районе опорной станции Хакасская, и распространить для этого макросклона значения градиентов южного мак-

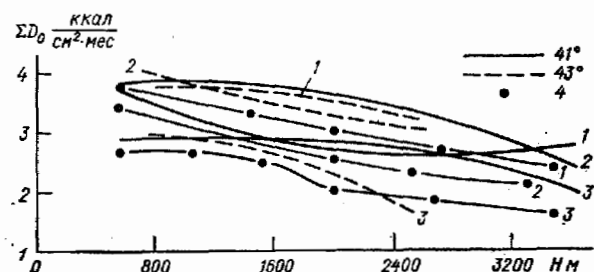


Рис. 5. Изменение сумм рассеянной радиации в зависимости от высоты над уровнем моря при безоблачном небе в горах Средней Азии.

По данным [151] для широт 41° и 43°: 1 — май, 2 — июль, 3 — сентябрь, 4 — по данным [27] для Кавказа и Средней Азии.

росклона, то и в этом случае вертикальные градиенты будут выше, чем в горах Восточной Сибири и Алтая.

Следует подчеркнуть, что в диапазоне $H=500 \div 2000$ м возможное приращение средних многолетних $\sum S'_0$ (с учетом градиентов южного макросклона) в условиях Западного Саяна на период летнего солнцестояния составляет 12 % и увеличивается до 25 % при уменьшении δ_{\odot} . В том же диапазоне H в Западном Тянь-Шане аналогичное приращение $\sum S'_0$ в течение мая—сентября составляет 11—13 %, т. е. за счет высоких абсолютных значений $\sum S'_0$ в более южных районах увеличение радиации с высотой происходит менее интенсивно, чем в северных, при обратном, соотношении значений градиентов.

При расчете вертикальных градиентов $\sum Q_0$ использовались вертикальные градиенты $\sum S'_0$ и вертикальные профили $\sum D_0$ при $\varphi = \text{const}$ (рис. 5). Влияние вертикального профиля $\sum D_0$ отражено в неоднозначном характере соотношения величин градиентов $\sum S'_0$ и $\sum Q_0$, хотя в целом уменьшение $\sum D_0$ с H приводит к снижению вертикальных градиентов суммарной радиа-

ции (табл. 7). Причем для теплого периода (май—сентябрь) региональные особенности очевидны из приведенных ниже значений отношения (в %) вертикальных градиентов Западного Саяна и Средней Азии для $H=500 \div 2000$ м:

	V	VI	VII	VIII	IX
Макросклон северный	70,8	91,5	94,5	152,0	161,8
южный	61,5	80,3	76,2	125,5	127,0

Таблица 7

Вертикальные градиенты $\sum Q_0$ в горах Средней Азии и Западного Саяна (кал/(см²·сут) на 100 м)

H м	Вариант	V	VI	VII	VIII	IX
Средняя Азия, $\varphi=41^\circ$						
500—2000	1 } $\Delta \sum Q_0$	7,00	6,00	5,33	4,66	4,33
	2 } $\Delta \sum Q_0$	6,80	5,46	5,36	3,80	3,66
	3 } $\Delta \sum Q_0$	6,66	6,05	5,44	4,79	3,23
	2. $\Delta \sum Q_0 / \Delta \sum S'_0 \%$	78,0	82,3	98,1	85,0	79,1
1500—2000	1 } $\Delta \sum Q_0$	8,00	5,00	10,00	6,00	4,00
	2 } $\Delta \sum Q_0$	11,40	5,60	2,40	6,00	2,20
	2	83,5	82,0	60,0	100,0	69,0
2000—3500	1 } $\Delta \sum Q_0$	3,00	4,27	3,33	4,00	2,00
	2 } $\Delta \sum Q_0$	1,11	1,95	1,61	2,02	1,17
	3 } $\Delta \sum Q_0$	1,21	0,78	0,81	2,62	1,76
	2. $\Delta \sum Q_0 / \Delta \sum S'_0 \%$	90,2	67,0	42,3	52,7	40,0
Западный Саян, $\varphi=53^\circ$ (по данным [143])						
500—2000 Северный макросклон	$\Delta \sum Q_0$	4,83	5,00	5,16	5,81	6,00
	$\Delta \sum Q_0 / \Delta \sum S'_0$	62,4	71,4	72,7	78,3	81,9
Южный макросклон	$\Delta \sum Q_0$	4,19	4,33	4,19	4,83	4,67
	$\Delta \sum Q_0 / \Delta \sum S'_0 \%$	92,7	86,6	86,6	83,1	82,4

Примечание. 1 — по данным И. И. Борзенковой [26] для Кавказа и Средней Азии, 2 — наши данные, 3 — по фактическим средним многолетним данным для ст. Ташкент — Кызылча и Кызылча — Тянь-Шань [151].

Использование средних градиентов, предложенных в [26] для Кавказа и Средней Азии, дает расхождение в $\sum Q_0$ порядка 1,0—7,4 %. Максимальные различия в $\sum Q_0$ при разных значениях градиентов соизмеримы с межширотными градиентами для сумм суммарной радиации на горизонтальную поверхность в зоне $\Delta\varphi=5 \div 6^\circ$.

1.4. ПРИХОД РАДИАЦИИ НА НАКЛОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ В ИНТЕРВАЛЕ ШИРОТ 41—53° ПРИ БЕЗОБЛАЧНОМ НЕБЕ

Для территории СССР в течение теплого периода года в целом характерно широтное распределение возможных сумм радиации [11, 15, 73, 74, 121, 141]. При этом снижение $\sum S_0'$ на $\varphi < 55^\circ$ на Европейской территории страны по сравнению с теми же широтами на Азиатской связано (помимо свойств преобладающих воздушных масс) с аэрозольным загрязнением атмосферы в промышленных районах ЕТС [121]. Этим же (согласно З. И. Пивоваровой) обусловлено снижение межширотных градиентов $\sum Q_0$ по сравнению с $\sum S_0'$: из-за большой мутности атмосферы рассеянная радиация безоблачного неба на 10—15 % на ЕТС больше, чем на АТС.

В целом низкие значения межширотных градиентов $\sum S_0'$ и $\sum Q_0$, характерные для макроклимата (табл. 8), объясняются компенсацией снижения интенсивности радиации в более высоких широтах за счет увеличения продолжительности светового дня.

Так, при фиксированных значениях p в интервале $\varphi = 41 \div 53^\circ$ $\sum S_0'$ за летние месяцы различаются всего на 5—12 %. Однако, как видно из табл. 9 и 10, эта компенсация не равнозначна для разных склонов. При увеличении продолжительности дня на северных склонах на 6—9 % (июнь—август) $\sum S_0^*$ на $\varphi = 52,7^\circ$ ниже $\sum S_0^*$ на $\varphi = 41,5^\circ$ на 11—21 % (среднекрутые склоны) и 21—39 % (крутые склоны). На южных и юго-западных (юго-восточных) крутых поверхностях с увеличением φ отмечается приращение $\sum S_0^*$ на 4—8 % при $\delta_\odot = 18 \div 23^\circ$, которое обусловлено соотношением угловых координат Солнца и склонов. При уменьшении δ_\odot и увеличении крутизны склона возрастает значимость соотношения угловых координат Солнца и склонов в определении межширотных различий для потоков и сумм радиации.

С увеличением φ значение K_s возрастает для южных склонов и уменьшается для северных (рис. 6). Это соотношение определяет формирование в целом более существенных пространственных различий в приходе радиации к склонам в высоких широтах. На одной широте контрасты усиливаются при уменьшении δ_\odot . Так, на $\varphi = 52,7^\circ$ на северных склонах крутизной 40° $\sum S_0'$ в сентябре составляет около 4 % от $\sum S_0'$ (0,3—0,7 ккал/(см²·мес)), на $\varphi = 41 \div 44^\circ$ для тех же условий $K_s = 22 \div 28$ % (2,5—4,7 ккал/(см²·мес)). В рассмотренном примере достаточно большая продолжительность светового дня в более северных районах не компенсирует преобладающего значения низких интенсивностей прямой радиации.

Таблица 8

Суммы прямой S_0' и суммарной Q_0 радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе на Европейской и Азиатской территориях СССР [121] (ккал/(см²·мес))

φ°	Характеристика	Сумма за год												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
56	$\sum S_0'$	1,7	3,8	8,6	12,1	16,3	17,5	16,6	13,6	9,3	5,3	2,5	1,3	108,6
	$\sum Q_0$	2,8	5,4	11,0	15,4	20,0	21,3	20,5	16,7	11,5	7,1	3,4	2,0	137,1
	$\sum S_0'$	2,3	4,7	9,4	12,7	16,4	17,2	16,8	13,8	10,1	6,5	3,5	2,0	115,4
	$\sum Q_0$	4,0	6,5	12,3	16,0	20,0	21,4	20,6	17,4	12,6	8,5	4,6	3,2	147,1
52	$\sum S_0'$	3,0	4,9	9,7	13,5	17,3	18,3	17,7	15,0	11,0	7,1	3,8	2,3	123,6
	$\sum Q_0$	4,0	6,7	12,5	16,5	20,9	21,6	21,1	17,8	13,0	9,0	4,6	3,4	151,1
	$\sum S_0'$	5,4	7,1	11,8	14,7	17,8	18,7	18,0	16,2	12,6	9,6	6,0	4,6	142,5
	$\sum Q_0$	6,7	9,4	14,6	18,0	21,5	22,0	21,5	18,9	15,0	11,2	7,4	6,0	172,2
44	$\sum S_0'$	6,7	8,3	12,7	15,5	18,3	18,3	17,7	16,2	12,8	10,2	7,0	5,7	149,4
	$\sum Q_0$	8,3	10,5	15,4	19,0	21,7	22,1	21,7	19,7	15,5	12,3	8,7	7,2	181,9
	$\sum S_0'$	3,0	4,9	9,7	13,5	17,3	18,3	17,7	15,0	11,0	7,1	3,8	2,3	123,6
	$\sum Q_0$	4,0	6,7	12,5	16,5	20,9	21,6	21,1	17,8	13,0	9,0	4,6	3,4	151,1
40	$\sum S_0'$	5,4	7,1	11,8	14,7	17,8	18,7	18,0	16,2	12,6	9,6	6,0	4,6	142,5
	$\sum Q_0$	6,7	9,4	14,6	18,0	21,5	22,0	21,5	18,9	15,0	11,2	7,4	6,0	172,2
	$\sum S_0'$	6,7	8,3	12,7	15,5	18,3	18,3	17,7	16,2	12,8	10,2	7,0	5,7	149,4
	$\sum Q_0$	8,3	10,5	15,4	19,0	21,7	22,1	21,7	19,7	15,5	12,3	8,7	7,2	181,9

Таблица 9

Отношение $\sum S_0^*$ на $\varphi = 52,7^\circ$ к $\sum S_0^*$ на $\varphi = 41,5^\circ$ для склонов разной крутизны ($\rho = 0,75$)

Месяц	Горизонтальная поверхность	B_c°	С	СВ	В	ЮВ	Ю
Май	0,91	20	0,84	0,86	0,91	0,95	0,97
		40	0,72	0,80	0,93	1,01	1,04
Июнь	0,95	20	0,89	0,90	0,95	0,99	1,00
		40	0,79	0,85	0,97	1,05	1,08
Июль	0,93	20	0,87	0,89	0,94	0,98	1,00
		40	0,76	0,83	0,96	1,03	1,06
Август	0,88	20	0,79	0,81	0,87	0,92	0,94
		40	0,61	0,76	0,89	0,97	1,00
Сентябрь	0,76	20	0,62	0,67	0,76	0,81	0,84
		40	0,11	0,60	0,79	0,87	0,90

Таблица 10

Отношение продолжительности дня на $\varphi = 41,5^\circ$ к продолжительности дня на $\varphi = 52,7^\circ$ для склонов разной крутизны

Месяц	Вариант	Север и горно-зональная поверхность	Крутизна склонов B_c°							
			СВ		В		ЮВ		Ю	
			20	40	20	40	20	40	20	40
Май	1	0,92	0,93	1,01	0,95	0,96	0,94	0,94	0,94	0,96
	2	93,8	87,1	1,68	79,8	65,5	82,1	74,4	82,7	76,2
Июнь	1	0,91	0,89	0,98	0,93	0,94	0,92	0,92	0,93	0,95
	2	100,0	96,5	76,9	85,3	72,2	86,7	78,2	86,1	77,1
Июль	1	0,91	0,91	0,99	0,94	0,95	0,93	0,93	0,95	0,95
	2	97,5	92,5	73,2	83,1	70,3	84,9	76,7	84,4	76,7
Август	1	0,94	0,96	1,05	0,97	0,98	0,96	0,96	0,96	0,97
	2	88,1	79,3	60,6	74,4	63,0	77,6	70,8	80,1	75,3
Сентябрь	1	0,99	1,03	1,14	1,02	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99
	2	76,1	63,8	45,7	63,4	53,5	68,3	63,2	74,3	73,3

Примечание. 1 — отношение продолжительности дня на $\varphi = 41,5^\circ$ к продолжительности дня на $\varphi = 52,7^\circ$; 2 — отношение продолжительности дня на $\varphi = 52,7^\circ$ к максимальной на этой φ продолжительности (991 мин) при $\delta_{\odot} = 23^\circ$.

На всех широтах минимум $\sum S_0^*$ в течение всего теплого периода отмечается на северных крутых склонах, максимум — на южных. Причем на $\varphi = 52,7^\circ$ в мае—июле этот максимум характерен для среднекрутых (20—30°) склонов, в конце лета — для склонов 30—40°. В более низких φ сдвиг абсолютного максимума $\sum S_0^*$ на крутые южные склоны происходит на 1,5—2 месяца позже.

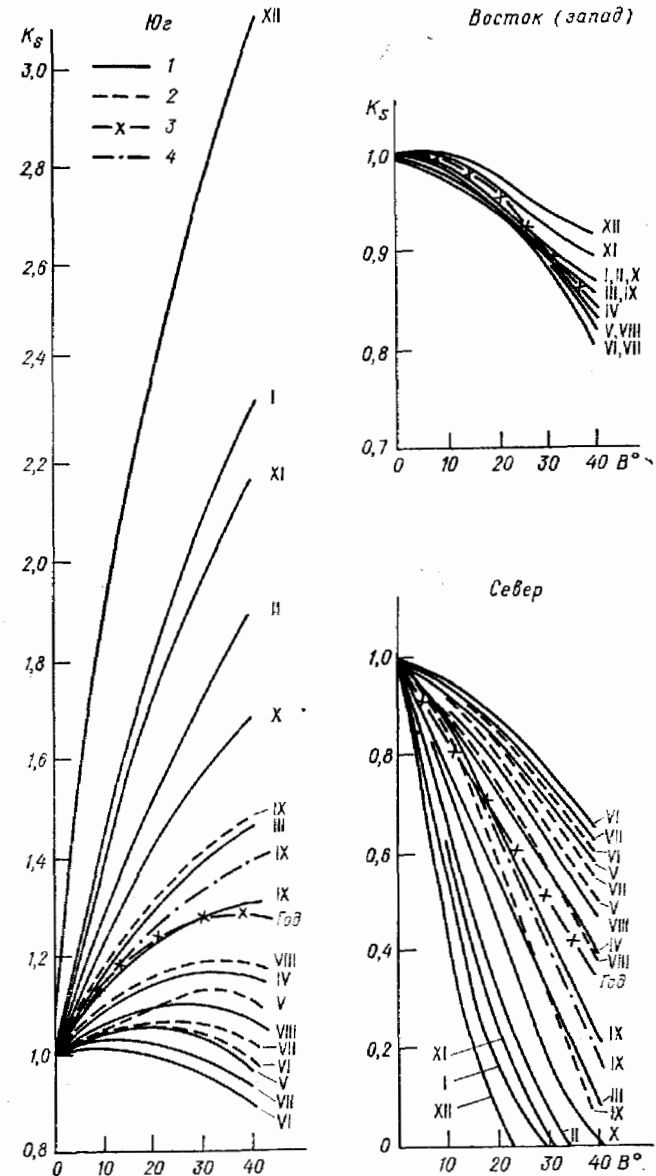


Рис. 6. Зависимость K_s от крутизны склона на $\varphi = 41 \pm 44^\circ$ (1) и $52,7^\circ$ (2).

3 — среднегодовое K_s на $\varphi = 41 \pm 44^\circ$, 4 — K_Q на $\varphi = 52,7^\circ$; римские цифры у кривых — месяцы.

При фиксированных значениях δ_{\odot} , ρ и экспозиции влияние крутизны наиболее сильно проявляется при северной ориентации склона (табл. 11). Различия в $\sum S_0^*$ между пологими и крутыми северными и восточными (западными) склонами возрастают как при уменьшении δ_{\odot} , так и при возрастании φ . В период летнего солнцестояния $\Delta \sum S_0^*$ в 2—7 раз выше, чем $\Delta \sum S_0$ в диапазоне $\varphi = 41 \div 53$. На южных склонах влияние крутизны в рассмотренном диапазоне φ проявляется в меньшей степени.

Таблица 11

Разность в $\sum S_0^*$ между пологими и крутыми склонами одной экспозиции ($\rho = 0,75$)

Экспозиция	Июнь ($\delta_{\odot} = 23^{\circ}$)		Сентябрь ($\delta_{\odot} = 3,2^{\circ}$)					
	$\varphi = 41,5^{\circ}$		$\varphi = 52,7^{\circ}$		$\varphi = 41,5^{\circ}$		$\varphi = 52,7^{\circ}$	
	$\sum S_0'$ ккал./($\text{см}^2 \cdot \text{мес}$)							
	19,8		18,8		13,3		10,1	
	1	2	1	2	1	2	1	2
С	5,7	0,29	7,0	0,37	7,6	0,57	7,3	0,72
СВ (СЗ)	5,1	0,26	5,9	0,31	5,4	0,41	4,6	0,46
В (З)	3,3	0,17	2,8	0,15	2,0	0,15	1,1	0,11
ЮВ (ЮЗ)	2,8	0,14	1,3	0,07	-1,3	0,10	-2,2	0,22
Ю	2,8	0,14	1,1	0,06	-1,8	0,14	-3,1	0,31

Примечание. 1 — $\Delta \sum S_0^* = (\sum S_{0,10^{\circ}}^* - \sum S_{0,40^{\circ}}^*)$ (ккал./($\text{см}^2 \cdot \text{мес}$));
2 — $\Delta \sum S_0^* / \sum S_0'$.

Влияние экспозиции усиливается в более северных широтах при уменьшении δ_{\odot} и увеличении крутизны склона (табл. 12). В период летнего солнцестояния на $\varphi = 41 \div 44^{\circ}$ разворот пологих склонов на $90-180^{\circ}$ обуславливает изменения в $\sum S_0^*$, соизмеримые с межширотными различиями в $\sum S_0'$ при $\Delta \varphi \approx 10 \div 12^{\circ}$. На $\varphi = 52,7^{\circ}$ межэкспозиционные градиенты при $\Delta A_c = 135 \div 180^{\circ}$ в 2 раза перекрывают межширотные. С увеличением крутизны межэкспозиционные градиенты резко возрастают.

Как следует из данных табл. 12, только при $\Delta A_c \geq 135^{\circ}$ различия в $\sum S_0^*$ идентичны тем, которые наблюдаются при изменении крутизны склона одной экспозиции на 30° . По абсолютным значениям $\Delta \sum S_0^*$ между склонами равной крутизны, но различной ориентации превышает $\Delta \sum S_0^*$ между пологими и крутыми склонами одной экспозиции только при уменьшении δ_{\odot} .

Таблица 12

Разность в $\sum S_0^*$ (нормированная к $\sum S_0'$) между склонами различных экспозиций ($\rho = 0,75$)

Экспозиция	ΔA_c	Июнь ($\delta_{\odot} = 23^{\circ}$)		Сентябрь ($\delta_{\odot} = 3,2^{\circ}$)	
		$\varphi = 41,5^{\circ}$	$\varphi = 52,7^{\circ}$	$\varphi = 41,5^{\circ}$	$\varphi = 52,7^{\circ}$
		$\sum S_0'$ ккал./($\text{см}^2 \cdot \text{мес}$)			
		19,8	18,8	13,3	10,1

Крутизна склонов 10°

С—СВ (СЗ)	45	0,01	0,02	0,04	0,06
С—В (З)	90	0,03	0,05	0,13	0,20
С—ЮВ (ЮЗ)	135	0,05	0,10	0,22	0,34
С—Ю	180	0,05	0,11	0,33	0,40
В—Ю	90	0,03	0,06	0,13	0,20
СВ (СЗ)—ЮВ (ЮЗ)	90	0,04	0,08	0,11	0,28
Ю—СВ (СЗ)	135	0,05	0,10	0,22	0,34
Ю—ЮВ (ЮЗ)	45	0,01	0,04	0,12	0,29

Крутизна склонов 40°

С—СВ (СЗ)	45	0,04	0,07	0,20	0,35
С—В (З)	90	0,15	0,18	0,55	0,84
С—ЮВ (ЮЗ)	135	0,20	0,40	0,86	1,27
С—Ю	180	0,20	0,43	0,96	1,46
В—Ю	90	0,05	0,15	0,41	0,62
СВ (СЗ)—ЮВ (ЮЗ)	90	0,16	0,33	0,57	0,72
Ю—СВ (СЗ)	135	0,16	0,35	0,76	1,21
Ю—ЮВ (ЮЗ)	45	0,00	0,04	0,12	0,29

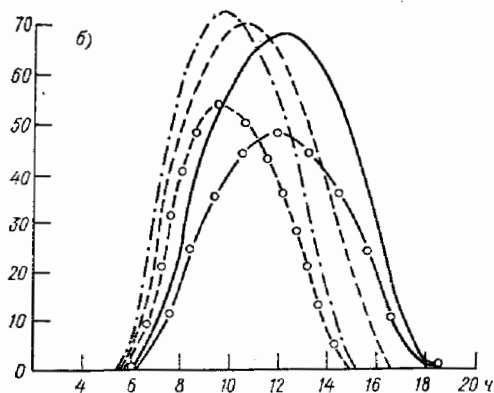
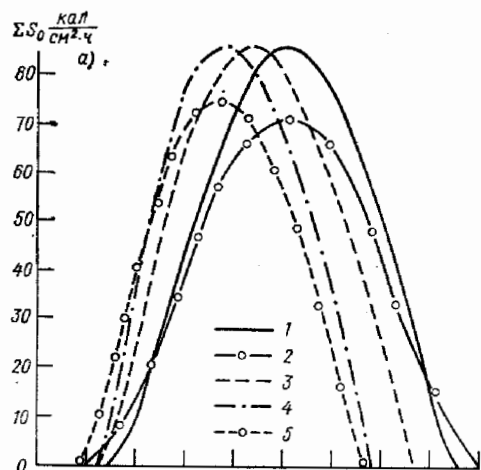
Пространственные градиенты $\Delta \sum S_0^*$ между крайними по условиям инсоляции склонами возрастают по мере увеличения φ и уменьшения δ_{\odot} (табл. 13).

Таблица 13

Экстремальные разности $\sum S_0^*$ (по отношению к $\sum S_0'$) на различных широтах при $\rho = 0,75$

Месяц	A_c, B_c		$\frac{\Delta \sum S_0^*}{\sum S_0'}$	A_c, B_c		$\frac{\Delta \sum S_0^*}{\sum S_0'}$
	абс. мин.	абс. макс.		абс. мин.	абс. макс.	
	$\varphi = 41,5^{\circ}$			$\varphi = 52,7^{\circ}$		
Май	С, 40	Ю, 10	0,44	С, 40	Ю, 20	0,65
Июнь	С, 40	Ю, 10	0,37	С, 40	Ю, 20	0,52
Июль	С, 40	Ю, 10	0,38	С, 40	Ю, 20	0,55
Август	С, 40	Ю, 20	0,57	С, 40	Ю, 30	0,83
Сентябрь	С, 40	Ю, 40	0,97	С, 40	Ю, 40	1,44

На $\varphi=41\div44^\circ$ в середине лета абсолютные величины ΣS_0^* на северных крутых склонах соизмеримы с ΣS_0^* на $\varphi=65\div70^\circ$, а на $\varphi=51\div53^\circ$ — с возможной инсоляцией горизонтальной поверхности на широте около 75° . При этом максимум ΣS_0^*



в пределах $\varphi=41\div53^\circ$ на пологих и среднекрутых южных склонах много выше, чем ΣS_0^* на $\varphi=38\div40^\circ$. В сентябре минимум ΣS_0^* на $\varphi=41\div44^\circ$ близок по абсолютной величине к ΣS_0^* в марте и октябре на $\varphi=75^\circ$, а максимум — к возможной инсоляции горизонтальной поверхности в середине лета на широтах южнее 40° [121, 141]. Таким образом, пространственные различия в ΣS_0^* , возможные

Рис. 7. Суточный ход часовых сумм прямой радиации на горизонтальную поверхность (г. п.) и восточные склоны 20° и 40° на широтах $41,5$ и $52,7^\circ$.

а) $\delta_\odot=23^\circ$, б) $\delta_\odot=-3,2^\circ$; 1) $\varphi=41,5^\circ$ (г. п.), 2) $\varphi=52,7^\circ$ (г. п.), 3 и 4) $\varphi=41,5^\circ$ (3 — склон 20° , 4 — склон 40°), 5) $\varphi=52,7^\circ$, склон 40° .

между склонами одной долины, соизмеримы с разницей в ΣS_0^* географических пунктов, удаленных по широте более чем на $30\text{—}35^\circ$. Причем эти потенциальные различия между ΣS_0^* увеличиваются в более высоких широтах.

Тенденция дневного хода часовых ΣS_0^* прежде всего определяется ориентацией склона. В годовом ходе эффект сдвига во времени наступления дневного максимума от истинного полдня на склонах, развернутых на восток и запад, наиболее сильно проявляется во время летнего солнцестояния [45]. В этот период в интервале $\varphi=41\div53^\circ$ сдвиг составляет $2\text{—}3$ ч, увеличиваясь для крутых склонов (рис. 7).

Резко выраженная неоднородность пространственного поля суммарной радиации при безоблачном небе формируется преимущественно за счет изменчивости ΣS_0^* . В течение теплого периода доля рассеянной радиации для большинства наклонных поверхностей не превышает $20\text{—}25\%$ ΣQ_0^* (рис. 8). Тем не менее вклад D_0 , увеличивающийся при низких δ_\odot для северных крутых склонов до 40% при одновременном его уменьшении для южных крутых, способствует формированию более высоких экспозиционных различий в ΣQ_0^* по сравнению с ΣS_0^* . В это время наблюдаются наибольшие расхождения в величинах K_s и K_Q (рис. 6 и 8). Причем для южных склонов $K_Q < K_s$, а для северных, наоборот, $K_Q > K_s$, что объясняется увеличением относительного вклада ΣD_0^* при общем снижении ΣS_0^* на северных склонах.

Совокупное воздействие факторов, определяющих радиационные характеристики макро- и мезоклимата, способствует формированию равных потенциальных энергетических ресурсов геосистем средних таксономических рангов. Как видно на примере Юго-Западного Тянь-Шаня (табл. 14), возможный приход пря-

Таблица 14

Равные значения сумм прямой радиации при безоблачном небе на северных и южных склонах в различных высотных поясах на $\varphi=41\div44^\circ$. Юго-Западный Тянь-Шань

Месяц	ΣS_0^* кал/(см ² ·сут)	Северные склоны		Южные склоны	
		B_c°	H м	B_c°	H м
Май	632	10	1800—2000	30	1000—1400
Июнь	661	10	1800—2000	20	1600—1800
	685	10	2000—2500	10	1600—1800
Июль	615	10	1800—2000	10	1000—1400
	631	10	2000—2500	10	1400—1600
Август	557	10	2000—2500	40	1000—1400
Сентябрь	403	10	2000—2500	40	1000—1400

мой радиации на северных пологих склонах можно сравнить с таковым на южных крутых и среднекрутых склонах при разнице в $H \geq 1000$ м. Данные табл. 14 свидетельствуют о том, что выделение общих закономерностей в изменении высотной поясности по радиационным характеристикам без учета экспозиционного фактора и крутизны склона не является объективным отражением радиационного режима горных геосистем.

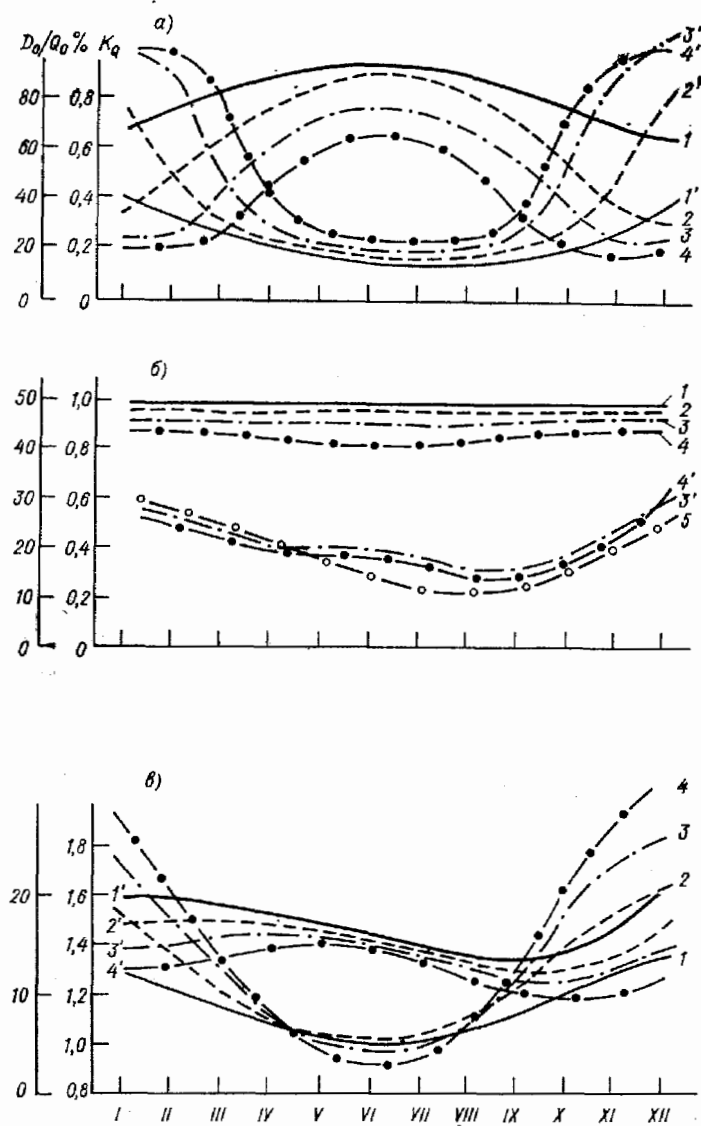


Рис. 8. Доля рассеянной радиации в суммарном потоке D_0/Q_0 , поступающем при безоблачном небе к поверхности открытых склонов (i' — $4'$), и изменение средних за месяц величин K_q (1 — 4) на $\varphi = 41 \pm 44^\circ$.

a — северные, $б$ — восточные, $в$ — южные склоны; 1 — склоны крутизной 10° , 2 — 20° , 3 — 30° , 4 — 40° , 5 — горизонтальная поверхность.

1.5. ПРИХОД РАДИАЦИИ ПРИ СРЕДНИХ МНОГОЛЕТНИХ УСЛОВИЯХ ОБЛАЧНОСТИ

1.5.1. Оценка влияния облачности при расчете действительных сумм радиации

Общим соотношением, связывающим суммы радиации при безоблачном небе и реальных условиях облачности, является выражение

$$\sum I_d = \sum I_0 f(N), \quad (13)$$

где $\sum I_0$ и $\sum I_d$ — соответственно возможные и действительные суммы радиации на горизонтальную поверхность, $f(N)$ — некоторая функция от параметра N , характеризующего влияние облачности. Эта функция обычно определяется на основе данных наблюдений. Для описания $f(N)$ предложен целый ряд эмпирических и полуэмпирических выражений, в которых с различной степенью детализации учитывается влияние балла облачности, оптических свойств облаков (через коэффициенты ослабления радиации) и продолжительности солнечного сияния [например, 14, 22, 25, 60, 63, 87, 91, 144, 146 др.].

В работе [76] мы провели сравнение точности расчета $\sum Q_d$ различными методами для территории юга Приморского края. Использование нелинейной зависимости для $f(N)$, предложенной Т. Г. Берлянд [12] и Е. П. Барашковой [14], дало расхождение с фактическими $\sum Q_d$ за месяц порядка 15—23%. При допущении относительно простых линейных зависимостей с введением региональных коэффициентов ослабления радиации облачности ошибки оказались ниже, порядка $\pm (4-10)\%$. Исходя из этого в дальнейших расчетах мы применяли линейные зависимости [146]:

для прямой радиации

$$f(N) = \left[1 - n + k \left(\frac{n + n_n}{2} \right) \right], \quad (14)$$

для суммарной радиации (в зависимости от исходной информации по облачности):

$$f(N) = [1 - (1 - k')n], \quad (15)$$

$$f(N) = \left[1 - (1 - k') \frac{n + n_n}{2} \right], \quad (16)$$

$$f(N) = \{1 - [c_n n_n + c_{св} (n - n_n)]\}, \quad (17)$$

где n , n_n — общая и нижняя облачность в долях единицы, k , k' — коэффициенты пропускания прямой и суммарной радиации, c_n , $c_{св}$ — коэффициенты ослабления суммарной радиации сплошной облачностью нижнего, среднего и верхнего ярусов.

Коэффициенты пропускания радиации, входящие в (14)—(17), определялись на основе многолетних сетевых данных (10—15-летние ряды) и собственных наблюдений за 3 года [125]. Процедура расчета коэффициентов пропускания заключалась в следующем. Для каждого месяца для градаций $h_{\odot} = 10^{\circ}$ по выборочной совокупности определялась средняя интенсивность и дисперсия потоков прямой и суммарной радиации при безоблачном небе, сплошной облачности нижнего, среднего и верхнего ярусов. При достаточном материале внутри яруса выделялись основные формы облаков. Далее строился гипотетический суточный ход радиации в предположении сохранения

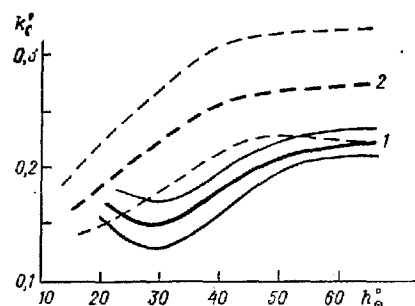


Рис. 9. Изменение коэффициента пропускания суммарной радиации k'_Q сплошной облачностью нижнего яруса в зависимости от высоты Солнца.

Средние данные: 1 — июль, Фрунзе; 2 — летний период, юг Приморского края; на рисунке показан возможный диапазон изменения k'_Q при $P=0,95$.

в течение дня облачности конкретного типа. Коэффициент пропускания определялся как отношение площади под кривой при облачности к аналогичной площади при безоблачном небе. Если расчет действительных сумм проводился через часовые суммы, то строился график зависимости коэффициентов пропускания от h_{\odot} (рис. 9).

Для юга Приморского края в среднем за летний период $k=0,42$. Эта величина хорошо согласуется со средними данными, приводимыми в литературе [61] для территории СССР за теплый период. Для Средней Азии (при осреднении за 1961—1975 гг.) величины k сильно варьируют как во времени, так и в пространстве. При этом за май—сентябрь k меняется в пределах $0,45—0,88$. Среднее за этот период значение $\bar{k}=0,64$, т. е. значительно выше $k=0,40$, характерного в среднем для территории СССР. Также на $0,15—0,20$ выше \bar{k} коэффициенты, полученные по ст. Кызыл (Западный Саян).

Коэффициенты пропускания суммарной радиации лежат в пределах изменчивости величин k' , опубликованных в литературе (табл. 15). Для Приморского края k' при сплошной облачности нижнего яруса несколько меньше, чем по данным Б. М. Гальперин и Л. П. Серяковой для Дальнего Востока [61]. Расхождение вполне объяснимо и связано с объединением при расчетах в [61] результатов наблюдений станций, расположен-

ных в различных по условиям циркуляции районах (включая такие, как Южно-Сахалинск и т. п.). Расхождение между нашими и литературными данными по Средней Азии обусловлены, очевидно, несоответствием рядов наблюдений, а отсюда различиями в повторяемости форм облаков. Так, по ст. Тянь-Шань в работе [26] (опубликованной в 1965 г.) приведены следующие коэффициенты (общие для всех ярусов при $n=10$):

V	VI	VII	VIII	IX
0,64	0,44	0,36	0,35	0,29

А при обработке материалов за 15-летний ряд наблюдений получены следующие значения общего коэффициента пропускания $k'_{об}$:

V	VI	VII	VIII	IX
0,55	0,51	0,52	0,52	0,58

Причем $k'_{об}$ является средневзвешенным коэффициентом, рассчитанным с учетом количества облаков соответствующего яруса.

Приведенные в табл. 15 значения k'_n для станций Средней Азии подтверждают известную тенденцию увеличения пропускания радиации с высотой. В то же время наблюдается снижение $k'_{св}$ и $k'_{об}$ для высокогорных станций на высоте около 2000 м (табл. 15, 16). Это свидетельствует о том, что коэффициенты пропускания в значительной степени определяются местной циркуляцией и связанными с ней формами облачности. В частности, снижение $k'_{св}$ для высокогорных станций Средней Азии вызвано увеличением повторяемости форм облаков среднего яруса, типичных для волновой деятельности [12, 28, 168].

И. И. Борзенкова [27] предложила для условий Кавказа и Средней Азии следующую зависимость $k'_{об}$ от высоты:

$$k'_{об H} = \frac{1}{100} (k'_{об 0} + 0,005H), \quad (18)$$

где H — высота над ур. м., м. Разница между фактическими и рассчитанными по (18) значениями $k'_{об}$ не превышает суммарную ошибку определения $k'_{об}$ ($\pm 7 \div 13\%$). Для отдельных месяцев (особенно в первую половину лета) аналогичные расхождения выше ошибки определения фактических $k'_{об}$. Отсюда следует, что при расчете $\sum Q_d$ за отдельные месяцы необходим учет региональных особенностей вертикального профиля коэффициентов пропускания радиации облачностью.

В табл. 17 и 18 на примере некоторых станций приведены результаты оценки точности расчета $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ по формулам (14)—(17). При расчетах использовались средние многолетние

Таблица 15

Коэффициенты пропускания суммарной радиации сплошной облачностью различных ярусов

Автор	Верхний ярус, k_B	Средний ярус, k_C	Нижний ярус, k_H	Конвективная облачность
М. Е. Берлянд [25]	0,80—0,60	0,50	0,20	0,40—0,31 0,30
Б. М. Гальперин [61]	0,83	0,50—0,40 0,31*	0,40—0,10 0,22*	
Н. И. Гойса [63]	0,89—0,82	0,52—0,39	0,28—0,25	
Б. Гаурвиц (цит. по [87])	0,85—0,68	0,52—0,40	0,35—0,15	
Н. Н. Калитин [87]	0,98—0,66	0,62—0,37	0,32—0,16	
С. М. Кузьмин (цит. по [76])	0,86		0,33	
В. С. Самойленко [145]	0,63		0,24	

Данные автора

Приморский край лето	0,78—0,76	0,53—0,42	0,26—0,25	0,39 (нижний ярус, кучевая облачность)
зима	0,72	0,45	0,27	
Май—сентябрь				
Фрунзе	0,88—0,81		0,24—0,19	
Алма-Ата, ГМО	0,83—0,77		0,31—0,19	
Алма-Ата, агро	0,76—0,71		0,31—0,19	
Кызылча	0,76—0,60		0,33—0,18	
Тянь-Шань	0,78—0,63		0,40—0,30	
Кызыл	0,90—0,72	0,74—0,40	0,30—0,25	

* Средние данные.

Таблица 16

Коэффициенты $k_{об}$ за теплый период для некоторых станций Средней Азии и Кавказа

Станция	H_m	V	VI	VII	VIII	IX	VI—VIII	V—IX
Махачкала	34	0,45	0,41	0,35	0,32	0,12	0,36	0,33
Фрунзе	760	0,52	0,54	0,52	0,53	0,49	0,53	0,52
Алма-Ата, ГМО	860	0,49	0,53	0,56	0,52	0,51	0,54	0,52
Кызылча	2075	0,45	0,41	0,47	0,54	0,52	0,47	0,48
Тянь-Шань	3612	0,55	0,51	0,52	0,52	0,58	0,52	0,54

Таблица 17

Сравнение средних многолетних $\sum S'_{дф}$ с расчетными $\sum S'_{дp}$ по формуле (14)

Станция	$\sum S'_{дp}$ ккал/(см ² ·мес)				
	V	VI	VII	VIII	IX
Ташкент	12,7	15,1	16,4	14,8	11,1
Тянь-Шань	10,6	10,7	10,9	10,6	9,5
Новосельская	8,8	8,8	9,1	7,4	6,6
Кызыл	10,4	10,1	9,7	9,1	6,7
Хакасская	8,5	8,7	8,4	7,5	5,1

Станция	$\sum S'_{дф}$ ккал/(см ² ·мес)				
	V	VI	VII	VIII	IX
Ташкент	12,2	14,9	16,3	14,7	10,9
Тянь-Шань	10,1	10,9	10,4	10,3	8,9
Новосельская	6,8	8,0	7,9	6,6	6,3
Кызыл	9,8	9,7	9,5	8,6	6,6
Хакасская	7,8	8,7	9,0	7,4	4,6

Станция	$(\sum S'_{дp} - \sum S'_{дф}) / \sum S'_{дф} \%$				
	V	VI	VII	VIII	IX
Ташкент	+4,1	+1,3	+0,6	+0,7	+1,8
Тянь-Шань	+4,9	-2,9	+4,8	+2,9	+6,7
Новосельская	+29,4	+10,0	+15,2	+12,1	+4,8
Кызыл	+5,7	+6,6	+2,0	+5,5	+1,5
Хакасская	+9,5	0,0	-6,7	+1,4	+10,9

данные об общей и нижней облачности и региональные коэффициенты пропускания радиации облачностью (из табл. 15, 16). В большинстве случаев расчетные суммы радиации отличаются не более чем на 10 % от фактических средних многолетних $\sum S_d$ и $\sum Q_d$. Причем ошибка не является систематической, так как наблюдаются отклонения как в сторону занижения, так и завышения по сравнению с фактическими суммами. Результаты сравнения расчетных и фактических сумм радиации свидетельствуют о том, что точность вводимых в (14)—(17) характеристик облачности более существенна для уточнения расчетных $\sum S_d$ и $\sum Q_d$, чем разные варианты формул (см. также [43, 76]).

Сравнение средних многолетних $\sum Q_{дф}$ с расчетными $\sum Q_{др}$ по формулам (15)–(17)

Станция	Формула	$\sum Q_{дф}$ ккал/(см ² ·мес)					$\sum Q_{др}$ ккал/(см ² ·мес)					$(\sum Q_{др} - \sum Q_{дф}) / \sum Q_{дф} \%$				
		V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX
Ташкент	16	17,2	19,1	20,1	18,1	14,0	17,7	19,7	20,6	18,4	14,6	12,9	3,1	2,5	1,7	4,3
	17						16,8	18,9	20,2	18,2	14,2	-2,4	-1,1	0,5	0,6	1,4
Тянь-Шань	16	20,1	19,3	17,7	16,2	13,8	19,0	18,4	18,8	17,4	14,7	-4,3	-4,7	6,2	7,4	6,5
	17						16,4	16,4	15,4	16,8	13,5	-18,4	-11,5	-13,0	3,7	-2,2
Новосельская	17	13,5	14,3	14,2	11,1	10,2	14,0	15,2	15,7	13,4	11,0	3,8	6,3	10,5	12,6	7,8
	15	12,7	13,2	12,7	12,1	9,9	13,3	12,8	12,1	11,3	9,2	4,7	-3,0	4,7	1,7	
Рудная Пристань	17															
	15	16,2	16,1	16,2	13,7	10,3	16,3	15,4	16,3	13,9	10,1	0,6	-4,3	0,6	1,4	-1,9
Кызыл	16						17,8	17,1	15,8	14,9	10,7	9,6	6,2	-2,5	8,7	3,9
	17						15,6	14,7	15,3	13,6	9,9	-3,7	-8,6	-5,5	-0,7	-3,9
	16 ¹						15,9	16,0	16,0	14,0	10,3	-1,9	-0,6	-1,2	2,0	0,0

¹ Для последней строки таблицы использованы данные Е. А. Садовничей [143]. Расчет производился по эмпирической зависимости между фактическими возможными и действительными суммами для ст. Кызыл: $\sum Q_d = \sum Q_0 \left(1 - \alpha \frac{n + n_n}{2} \right)$, где $\alpha = 0,48$ (май, июль), $\alpha = 0,52 + 0,53$ (июнь, август), $\alpha = 0,50$ (сентябрь).

Реальность расчетных оценок $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ для территории связана с репрезентативностью характеристик облачности. В горных районах эти характеристики обладают большой пространственной изменчивостью, обусловленной преимущественно особенностями местной циркуляции. Кроме того, редкая сеть станций, ведущих наблюдения за облачностью в горных районах, не позволяет получить достаточно точные осредненные для территорий характеристики облачности. В отдельных случаях для предгорий при экстраполяции данных по облачности можно использовать критерии, приведенные в [152]. Но в основном для горных условий мы вынуждены осреднять имеющиеся данные для разных высотных поясов с учетом расположения станций по отношению к основному переносу воздушных масс.

Так, например, на рис. 10 приведен средний вертикальный профиль общей n и нижней n_n облачности для климатической области Западный Тянь-Шань. При построении профиля использовались данные наблюдений 13 станций, расположенных в различных физико-географических районах Западного Тянь-Шаня. Общие тенденции вертикального профиля n и n_n соответствуют отмеченным Б. А. Алисовым и Б. В. Полтораусом [12] для Средней Азии. Однако ошибка осреднения при оценке n и n_n для $H=800-1800$ м лежит в пределах 1,3–7,6% (увеличиваясь для n_n), а в диапазоне $H=1800-2200$ м — в пределах 10–23% (возрастая как для n , так и n_n во вторую половину теплого периода). При этом увеличение количества облаков и вариабельности средних многолетних значений n и n_n на высотах более 2000 м связано с частой повторяемостью кучево-дождевой облачности на орографических фронтах при холодных вторжениях [12, 28, 168]. В итоге суммарная ошибка расчета $\bar{f}(N)_{мес}$ в формулах (14)–(17) с учетом ошибок определения k и k' изменяется от 8 до 33%. С большей погрешностью определяется $\bar{f}(N)$ для высот более 2000 м.

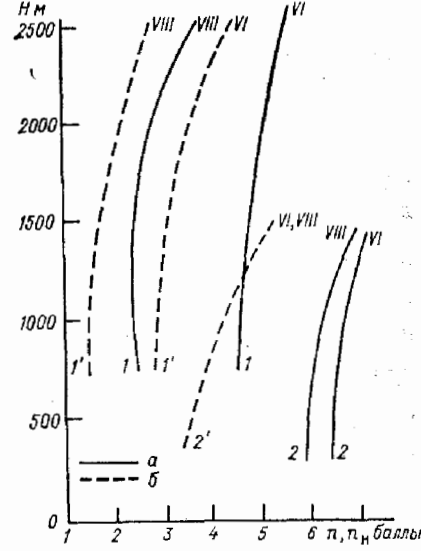


Рис. 10. Вертикальный профиль общей (а) и нижней (б) облачности по средним многолетним данным за июнь и август для климатических областей Западный Тянь-Шань (1, 1') и Западный Саян (2, 2').

Для районов с меньшей изменчивостью характеристик облачности ошибки $\bar{f}(N)$ за счет осреднения по территории составляют 6—14%. Такие ошибки были получены, например, для восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня, северного и южного макросклонов Западного Саяна.

В связи со спецификой климата Западного Саяна вертикальные профили облачности определялись отдельно для северного и южного макросклонов (рис. 10). Е. А. Садовничей [143] была проведена аппроксимация вертикального профиля комплексной характеристики $\bar{n} = (n + n_n)/2$ за период май—сентябрь линейной регрессией типа

$$\bar{n} = a + bN, \quad (19)$$

где $a = 0,513 \div 0,525$ для северного макросклона и $0,405 \div 0,480$ для южного, $b = 0,07 \div 0,12$ для обоих макросклонов.

Для юга Приморского края облачный режим подробно рассмотрен в [13, 75, 147]. Сводки средних многолетних и экстремальных значений \bar{n} и $s = n - n_n$ для этой территории приведены в работе [76]. С помощью итерационного метода станции классифицировались по характеристикам общей и нижней облачности. По этой классификации выделяются территориальные группы первого уровня (континентальные и прибрежные районы) как следствие воздействия на облачный режим основного фактора — меридионально вытянутых хребтов Сихотэ-Алиня. Более мелкое дробление внутри каждой группы обусловлено различиями в мезомасштабных процессах облакообразования. Так, например, внутри группы континентальных станций выделяются подгруппы равнинных и долинных (восточных и западных предгорий) станций.

В континентальных районах (рис. 11) типичны более низкие значения \bar{n} , чем в прибрежных. Максимальные значения s повсеместно отмечаются в мае. Для станций, расположенных к востоку от главного водораздельного хребта, минимальные значения s приходится на июль. В этом месяце (рис. 12) происходит интенсивное развитие нижней облачности, связанное как с преобладанием циклонического типа погоды (на побережье), так и с термической конвекцией (в более континентальных районах). Летом в течение дня значения \bar{n} и s остаются постоянными.

Значительная пространственная изменчивость этих параметров отмечается в утренние и вечерние часы (например, утром в более континентальных районах $\bar{n} = 0,53$, а в прибрежных $\bar{n} = 0,72$ и т. п.). Днем пространственные различия сглаживаются, так как в континентальных районах активизируются процессы облакообразования, а на побережье, наоборот, происходит

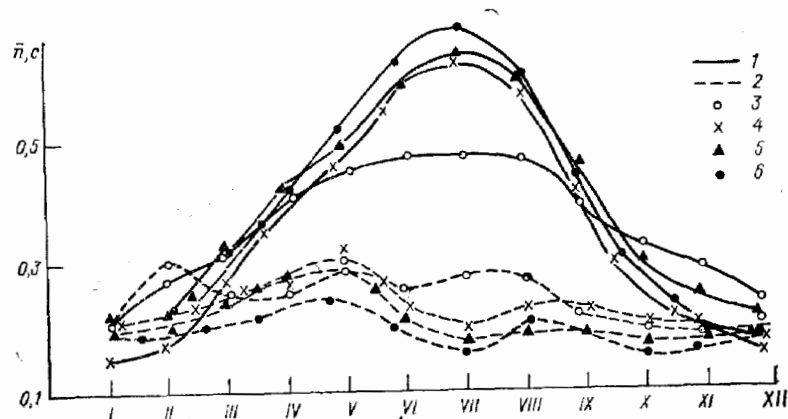


Рис. 11. Изменения параметров \bar{n} (1) и s (2) вдоль $\Phi = 44^\circ$ в течение года на территории Приморского края по средним многолетним данным.

3 — Рудная Пристань, 4 — Богополь, 5 — Фурманово, 6 — Евгеньевка.

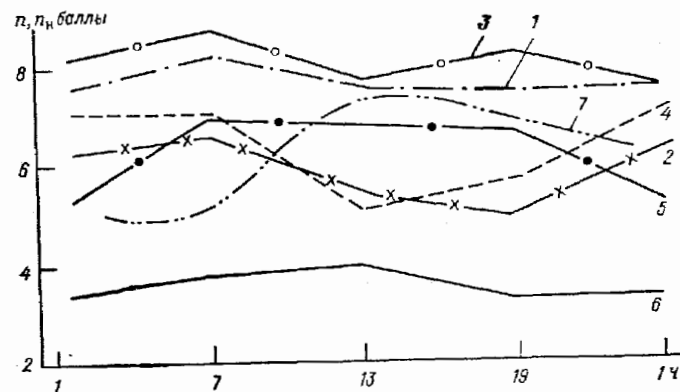


Рис. 12. Средний многолетний суточный ход общей n и нижней n_n облачности за июль на юге Приморского края и в Западном Саяне.

Фурманово: 1) n , 2) n_n ; Находка: 3) n , 4) n_n ; Евгеньевка: 5) n , 6) n_n ; Западный Саян, Оленья Речка: 7) n .

растекание облачности. Вертикальные градиенты \bar{n} и c для Приморского края много ниже, чем градиенты, формирующиеся за счет увеличения континентальности климата по мере удаления от побережья.

Таким образом, используемый в работе алгоритм расчета $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ позволяет с достаточно высокой точностью оценить суммы радиации для конкретных пунктов, по которым имеется информация об облачности. Для больших территорий за счет ограниченных возможностей осреднения по незначительному числу станций ошибки определения средних сумм радиации возрастают в отдельных случаях до 30%. Очевидно, что эти ошибки могут быть и выше в зависимости от характера общей и местной циркуляции. Однако в настоящее время повысить точность определения средних многолетних сумм радиации для горных районов не представляется возможным.

Дальнейший расчет $\sum S_d^*$ и $\sum Q_d^*$ проводился аналогично расчету сумм на горизонтальной поверхности. При этом допускалось, что функция $f(N)$ является постоянной для произвольно ориентированных поверхностей. Неоднозначное влияние облачности на приход радиации к различно ориентированным склонам учитывался только через дневной ход \bar{n} и k при расчете часовых $\sum S_d^*$. Дневная $\sum Q_d^*$ находилась на основе $\sum Q_0^*$ и $f(N)$ при введении в последнюю средних за день характеристик облачного режима.

На основе $\sum S_d$, $\sum S_d^*$, $\sum Q_d$ и $\sum Q_d^*$ для ИНТ радиации рассчитывались суммы радиации в области ФАР. При этом использовались переходные коэффициенты и их изменение с h_{\odot} , приведенные в работах [64, 74, 107, 119, 156]. Для Приморского края использовались результаты, полученные Н. В. Зукерт [80], которые подтвердили несущественную зависимость переходных коэффициентов от h_{\odot} при $h_{\odot} > 20^\circ$. Для $h_{\odot} > 20^\circ$ суммы ФАР определялись по следующей формуле:

$$\sum Q_{\text{ФАР}} = 0,43 \sum S + 0,57 \sum D, \quad (20)$$

и это соотношение принималось справедливым для $H \leq 3000$ м, так как в пределах этих высот спектральное распределение радиации (доля ФАР) практически постоянно [3, 175 и др.].

1.5.2. Региональные особенности радиационного режима склонов при действительных условиях облачности

Рассмотрим закономерности прихода радиации к верхней границе растительного покрова для трех горных районов: Среднего Сихотэ-Алиня (юг Приморского края), Юго-Западного Тянь-Шаня и Западного Саяна, которые относятся к разным

климатическим областям умеренного климатического пояса [11]. Эти горные системы лежат в интервале $\varphi = 41 \div 53^\circ$, и приведенные в п. 1.4 данные характеризуют возможный на этих широтах приход радиации при безоблачном небе. При переходе к действительным суммам радиации, помимо характеристик режима облачности, учитывались региональные особенности режима прозрачности атмосферы, и исходные величины возможных сумм радиации находились путем интерполяции для заданных значений p_2 , характерных для исследуемых территорий.

1.5.2.1. Юг Приморского края (климатическая муссонная дальневосточная область)

Вследствие особенностей годового хода прозрачности атмосферы годовые $\sum S_0$ и $\sum Q_0$ здесь на 5—6 ккал/см² ниже, чем среднеширотные $\sum S_0$ и $\sum Q_0$ в целом на Азиатской территории СССР [121, 141]. Абсолютный максимум в годовом ходе радиации при безоблачном небе наблюдается в мае (в среднем для той же φ в июне), минимум — в декабре (табл. 19). Майский максимум $\sum S_0^*$ и $\sum Q_0^*$ сохраняется для всех склонов, за исключением крутых поверхностей, развернутых к северу. Продолжительность периода с прямой радиацией для этих поверхностей также сокращается, и на северные склоны крутизной 40° прямая радиация поступает только с марта по сентябрь (табл. 19).

Значительная облачность, развивающаяся во время летнего муссона (табл. 20), снижает $\sum S_d$ до 33—34% от $\sum S_0$. В этот период средние многолетние месячные $\sum S_d$ в 1,2—2 раза ниже, чем на тех же широтах в западных районах страны (табл. 21).

Также аномально низкими для $\varphi = 44^\circ$ являются суммы ФАР за вегетационный период с $t_b \geq 10^\circ\text{C}$. Приход ФАР в этот период близок к таковому в районах Риги, Свердловска, Смоленска [73, 74]. Зимой на Дальнем Востоке устанавливается антициклонический тип погоды [12, 13]. С ноября по март над югом Приморского края циклонов в 2,5 раза меньше, чем летом [13]. В это время господствуют воздушные массы, стекающие по восточной и юго-восточной перифериям области повышенного давления, расположенной над восточной окраиной Евразийского материка. Для них характерно малое влагосодержание, обусловленное антициклонической циркуляцией и сильным выхолаживанием приземных слоев атмосферы. Следствием указанных процессов является преобладание ясной погоды, наиболее устойчивой на побережье и в восточных предгорьях Сихотэ-Алиня (см. табл. 20). При незначительной облачности и высокой прозрачности атмосферы ($p_2 = 0,77 \div 0,81$) $\sum S_d$ равны таковым в более южных районах на $\varphi = 38 \div 40^\circ$ [121, 140].

Суммы прямой радиации (ккал/см²) при безоблачном небе и средних многолетних значениях прозрачности атмосферы на $\varphi = 44,3^{\circ}$ (юг Приморского края)

A _c	B _c	Прозрачность атмосферы P ₂												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
		0,80	0,80	0,75	0,75	0,75	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80	0,80
Горизонтальная поверхность С	10	4,7	6,9	10,9	15,0	18,9*	17,8	17,8	15,4	12,5	8,4	5,4	3,1**	
	20	2,6	4,6	8,7	13,2	17,0*	16,9	16,7	13,9	10,5	6,0	3,3	1,3**	
	30	0,6	2,4	6,2	10,8	15,7*	15,4	15,2	12,0	8,1	3,8	1,2	0,2**	
	40	—	0,3	3,6	8,4	13,4	13,6*	13,4	9,7	5,6	1,4	—	—	
СВ (СЗ)	10	3,2	5,2	9,3	13,6	17,8*	17,1	17,0	14,3	11,0	6,6	3,9	2,5**	
	20	1,9	3,7	7,5	11,8	16,3*	15,8	15,5	12,7	9,2	5,0	2,5	1,1**	
	30	1,0	2,4	5,7	10,0	14,2*	14,1	13,8	10,9	7,4	3,6	1,4	0,6**	
	40	0,5	1,6	4,3	8,0	12,0*	12,1	11,7	8,9	5,8	2,6	0,8	0,2**	
В	10	4,6	6,7	10,7	14,8	18,6*	17,5	17,5	15,2	12,3	8,3	5,4	3,1**	
	20	4,3	6,3	9,8	13,5	16,8	16,8	16,8	14,7	11,2	8,0	5,2	3,0**	
	30	4,3	6,0	9,3	12,5	15,6*	14,5	14,5	12,7	10,6	7,2	4,8	2,9**	
	40	4,1**	8,2	12,2	15,9	19,4*	18,0	18,1	16,1	14,3	9,7	6,8	5,1**	
ЮВ (ЮЗ)	10	7,2	9,3	12,9	16,3	19,3*	17,7	17,9	16,8	14,6	10,7	8,0	6,2**	
	20	8,1	10,2	13,6	16,4	18,8*	17,0	17,2	16,1	14,6	11,4	8,9	7,1**	
	30	8,8	10,7	13,8	16,0	17,9*	15,8	16,2	15,5	14,6	11,8	9,5	7,3**	
	40	8,6	8,8	12,7	16,2	18,7*	18,2	18,3	16,4	14,1	10,3	7,4	5,6**	
Ю	10	8,3	10,5	14,1	17,2	19,8*	18,0	18,3	17,0	15,3	11,9	9,2	7,2**	
	20	9,8	11,9	15,2	17,6	19,4*	17,3	17,7	17,0	16,1	13,1	10,6	8,7**	
	30	10,9	13,0	15,9	17,4	18,4*	16,1	16,6	16,5	16,3	14,0	11,7	9,7**	

* Максимум $\sum S_0$ и $\sum S_0^*$

** Минимум $\sum S_0$ и $\sum S_0^*$

Таблица 20

Коэффициенты устойчивости ясной K_я и пасмурной K_п погоды для некоторых станций Приморского края (%) [76]

Сезон	Характеристика	С запада на восток, $\varphi = 44^{\circ}$				С севера на юг по побережью			
		Евгеньевка	Арсеньев	Фурманово	Богополь	Рудная Пристань	Валентин	Находка	Владивосток
Зима	K _я	65	61	66	77	70	72	72	70
	K _п	39	43	32	35	31	32	31	28
Лето	K _я	39	22	28	28	32	41	18	28
	K _п	60	65	78	79	82	80	80	85

Примечание. $K_{я} = \frac{n_{я}}{p_{0-2}} \cdot 100\%$; $K_{п} = \frac{n_{п}}{p_{8-10}} \cdot 100\%$, где p_{0-2} и p_{8-10} — повторяемость ясного и пасмурного неба (%); $n_{я}$, $n_{п}$ — число ясных и пасмурных дней.

Таблица 21

Средние многолетние суммы радиации при действительных условиях облачности на $\varphi = 44 \div 45^{\circ}$ (ккал/см²·период)

Станция	Июнь—август			Год		ФАР за период с $t_{в} \geq 10^{\circ}C$
	$\sum S_{д}$	$\sum D_{д}$	$\sum D_{д} / \sum S_{д}$	$\sum S_{д}$	$\sum D_{д} / \sum S_{д}$	
Форт-Шевченко	33,6	14,5	0,43	74,6	0,58	41,1
Чурук	37,2	15,1	0,41	86,9	0,52	44,1
Куйган	41,7	13,8	0,33	93,6	0,49	43,9
Новосельская	22,5	17,9	0,80	65,0	0,82	27,0
Рудная Пристань	19,4	18,6	0,96	64,9	0,80	25,9

В период с марта по май происходит перестройка атмосферной циркуляции от зимнего режима к летнему. Осенью (сентябрь—ноябрь) отмечается обратная направленность циркуляционных процессов. Их однотипность в переходные периоды определяет сходство и в режиме облачности, хотя уменьшение облачности осенью гораздо значительнее, чем весной. В середине переходных периодов $\sum S_{д}$ и $\sum Q_{д}$ на юге Приморского края близки к средним на широте 44—45°.

В целом следствием преобладающего влияния летнего муссона является снижение в 1,5 раза годовой $\sum S_{д}$, увеличение в 1,2—1,3 раза $\sum D_{д}$ и сокращение амплитуды (в 2—3 раза)

годового хода радиации по сравнению с западными континентальными районами страны, расположенными на тех же широтах.

На фоне общего нарушения широтной зональности в распределении $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ на территории наблюдается значительная изменчивость прихода радиации, порождаемая сильной расчлененностью рельефа. При этом меридиональное расположение основного хребта Сихотэ-Алия при относительно низких абсо-

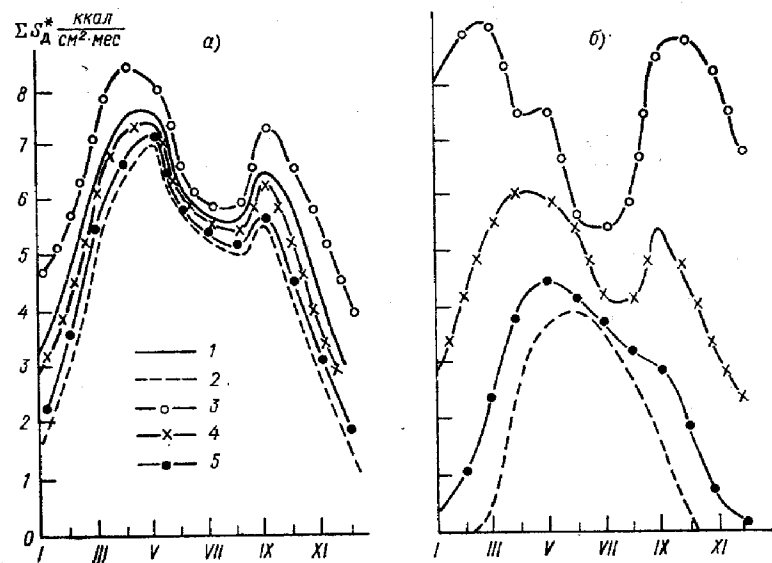


Рис. 13. Годовой ход месячных сумм прямой радиации при средних многолетних условиях облачности на территории юга Приморского края.

а — крутизна 10°, б — крутизна 40°; 1 — горизонтальная поверхность; склоны: 2 — северные, 3 — южные, 4 — восточные, 5 — северо-западные.

лютных высотах (менее 200 м) в условиях муссонной циркуляции способствует формированию явно выраженных пространственных градиентов между прибрежной и континентальной частями территории.

Прямая радиация. Следствием режима облачности является формирование в годовом ходе $\sum S_d$ и $\sum S_d^*$ двух минимумов — основного в декабре и вторичного в июле—августе (рис. 13). Исключение составляют южные крутые склоны, для которых характерен один минимум $\sum S_d^*$ в июле. Обратный по сравнению с горизонтальной поверхностью годовой ход на этих склонах объясняется двумя причинами: высокой инсоляцией в зимние месяцы и значительным развитием облачности летом

Заслуживает внимания смещение во времени основного (весеннего) максимума по направлению к зимним месяцам для склонов с южной составляющей. Так, южные, юго-восточные (юго-западные) крутые склоны имеют максимум прямой радиации в марте, среднекрутые — в апреле. Также в апреле максимум $\sum S_d^*$ отмечается на восточных и западных склонах крутизной 40°. Для чисто северных среднекрутых и крутых склонов, а также северо-восточных (северо-западных) крутизной 40° отмечается только один максимум, который для всех склонов (кроме северного крутизной 40°) приходится на май. Симметричный годовой ход $\sum S_d^*$ характерен только для северных склонов крутизной 40° (рис. 13).

За три летних месяца максимальные различия в инсоляции склонов достигают примерно 9 ккал/см²·период. Причем $\sum S_d^*$ за вегетационный период на северных крутых склонах практически равна $\sum S_d'$ за этот же период в районе Охотска.

На южные пологие склоны (до 20°) поступает примерно столько же радиации, сколько на горизонтальную поверхность в районе Каунаса, т. е. абсолютный максимум $\sum S_d^*$ много ниже возможного для $\sum S_d'$ на $\phi=44^\circ$ [121].

Сокращение амплитуды между экстремальными $\sum S_d^*$ за вегетационный период связано прежде всего с соотношением продолжительности облучения прямой радиацией северных крутых (максимальная продолжительность светового дня) и южных пологих склонов. Тенденция к увеличению светового дня, характерная для северных склонов летом, аналогична таковой в высоких широтах. Поскольку максимум S_d на южных склонах формируется в основном за счет высоких интенсивностей в околопуденные часы и в эти же часы летом наблюдается максимум в суточном ходе облачности [75], то относительное воздействие облачности на приход прямой радиации к южным склонам больше, чем к северным. Поэтому сглаживание $\Delta \sum S_d^*$ между экстремальными значениями в летний период является следствием воздействия двух факторов: продолжительности светового дня и суточного хода облачности.

Максимальные различия в $\sum S_d^*$, поступающих на склоны, отмечаются в переходные периоды. В марте абсолютный минимум $\sum S_d^*$ на северных склонах крутизной 40° равен 0,51 ккал/(см² × мес), абсолютный максимум на южных склонах этой же крутизны составляет 9,23 ккал/(см²·мес). Подобные различия в переходные периоды возможны между $\sum S_d'$ на широтах, удаленных на 32° [121, 141]. Причиной формирования в этот период больших пространственных градиентов $\sum S_d^*$ между склонами являются те же факторы: продолжительность светового дня и суточный ход облачности. Продолжительность светового дня,

мало меняющаяся в годовом ходе для южных склонов, для северных в переходные периоды близка к минимальной зимней. Это обстоятельство при сравнительно большой полуденной h_{\odot} и незначительной облачности способствует тому, что на южные крутые склоны поступает на 40—50 % меньше прямой радиации, чем при ясном небе.

$\Sigma S_{\text{д}}^* \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}}$

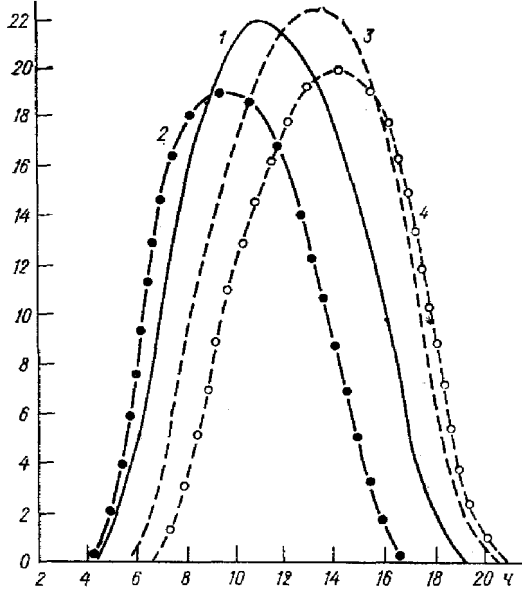


Рис. 14. Суточный ход часовых сумм прямой радиации на восточных и западных склонах при средних многолетних условиях облачности на территории юга Приморского края.

Восточные склоны: 1) 20°, 2) 40°; западные склоны: 3) 20°, 4) 40°.

В зимний период допуденный максимум в суточном ходе облачности выражен значительно слабее [75]. Поэтому при частой повторяемости ясной погоды и низких значениях ΣS_0^* различия в $\Sigma S_{\text{д}}^*$ между восточными и западными склонами нивелируются. В переходные периоды (на общем фоне ослабления возможного прихода радиации облачностью) сохраняется подобие дневного хода ΣS_0^* и $\Sigma S_{\text{д}}^*$ для склонов произвольной ориентации и крутизны [43].

В табл. 22 приведены значения K_s для месячных $\Sigma S_{\text{д}}^*$. Сравнение этих данных с K_s (см. рис. 6) показывает, что в целом между величинами K_s и K_s различия незначительны. Наибольшие расхождения отмечаются в период зимнего

Наиболее сильное влияние облачности на дневной ход прямой радиации проявляется в летний период. Основным следствием асимметрии суточного хода облачности [75] является сдвиг положения максимума дневной $\Sigma S_{\text{д}}^*$ от южных склонов в сторону поверхностей, несколько развернутых к западу (ЮЮЗ—ЮЗ) [43]. В результате влияния облачности происходит также нарушение равенства дневных и месячных $\Sigma S_{\text{д}}^*$ на восточных и западных склонах в основном за счет большего сокращения максимальных часовых сумм на восточных склонах (рис. 7 и 14).

Таблица 22

Коэффициенты K_s при средних многолетних условиях облачности на $\varphi = 44^\circ$. Юг Приморского края

A_c	B_c°	$\Sigma S_{\text{д}}^* \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2 \cdot \text{мес}}$	Коэффициенты K_s												Год													
			C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	CЗ	I	II	III	IV		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII					
	20	20	3,31	0,13	—	0,40	0,96	1,53	1,78	2,40	1,55	1,03	0,40	0,40	0,10	4,75	6,65	7,34	7,68	6,00	5,63	5,46	6,49	5,33	3,80	2,70	65,14	
	40	40	0,13	—	—	0,10	0,88	1,82	2,40	1,90	1,03	0,94	0,86	0,59	0,48	0,34	0,08	0,37	0,48	0,62	0,60	0,49	0,22	0,46	0,22	0,08	0,64	0,28
	20	40	0,40	0,10	0,54	0,96	1,53	1,82	1,78	1,55	1,03	0,94	0,86	0,59	0,48	0,34	0,08	0,37	0,48	0,62	0,60	0,49	0,22	0,46	0,22	0,08	0,64	0,28
	40	20	0,10	0,54	0,94	1,53	1,82	1,78	1,55	1,03	0,94	0,86	0,59	0,48	0,34	0,08	0,37	0,48	0,62	0,60	0,49	0,22	0,46	0,22	0,08	0,64	0,28	0,64
	20	20	0,96	0,88	0,87	0,90	0,81	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	40	40	0,88	0,87	0,87	0,81	0,83	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	20	20	1,53	1,82	1,34	0,90	0,81	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	40	40	1,82	1,57	1,57	0,87	0,81	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	20	20	1,78	1,27	1,27	0,94	0,87	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	40	40	2,40	1,89	1,89	0,87	0,87	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	20	20	1,55	1,36	1,36	0,96	0,87	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	40	40	1,90	1,57	1,57	0,87	0,87	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	20	20	1,03	0,96	0,96	0,90	0,81	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	40	40	0,87	0,87	0,87	0,79	0,87	0,83	0,72	0,91	0,86	0,75	0,79	0,67	0,58	0,46	0,34	0,23	0,58	0,67	0,64	0,56	0,45	0,30	0,14	0,06	0,44	0,44
	20	20	0,40	0,55	0,55	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	40	40	0,10	0,23	0,23	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

солнцестояния для южных крутых склонов. Во время летнего солнцестояния K'_s практически равно K_s , за исключением крутых склонов, развернутых к северу. Для склонов с западной составляющей K'_s несколько больше, чем K_s для склонов восточной составляющей, что объясняется рассмотренным ранее влиянием облачности на дневной ход часовых ΣS_d^* .

Суммарная радиация. При действительных средних многолетних условиях облачности годовая ΣQ_d составляет 70 %

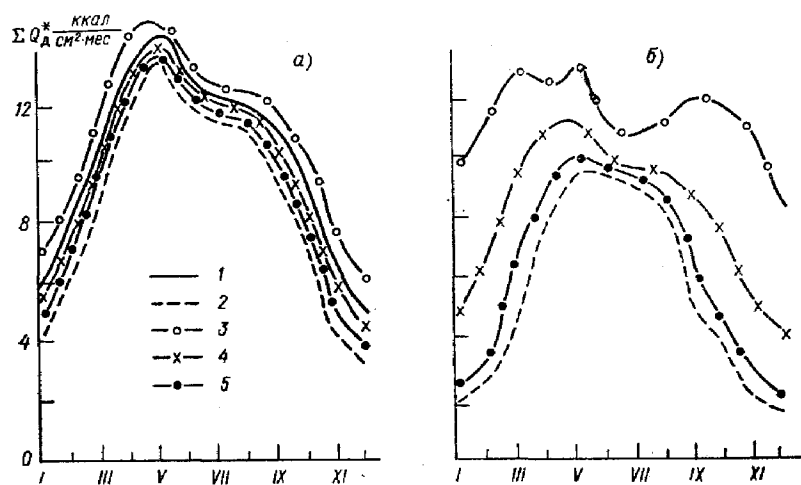


Рис. 15. Годовой ход месячных сумм суммарной радиации при средних многолетних условиях облачности на территории юга Приморского края. Усл. обозначения см. рис. 13.

от ΣQ_0 . Всего на 14 % снижается ΣQ_d^* за год на крутых склонах, развернутых к северу. Для южных склонов влияние облачности на ΣQ_d^* очень велико (ΣQ_d^* за год составляет 67 % от ΣQ_0^*). За три летних месяца наиболее интенсивное снижение возможных сумм отмечается для тех поверхностей, где в суммарном потоке преобладает прямая радиация. Так, на южных пологих склонах (до 20°) ΣQ_d^* за июнь—август сокращается на 42 %, а на северных крутых на 28 % по сравнению с возможными суммами.

Абсолютный максимум в годовом ходе отмечается в мае (14,2 ккал/(см²·мес)) и его положение сохраняется практически для всех склонов (рис. 15), за исключением крутых северных (июнь) и юго-восточных (апрель). Таким образом, годовой

ход ΣD_d нивелирует изменение месячных ΣS_d^* , абсолютные максимумы которых (см. рис. 14) наблюдаются на различных склонах в разное время (от марта до июня).

Следует подчеркнуть, что в результате влияния рассеянной радиации K'_Q значительно отличаются от K'_s (табл. 22, 23). Поэтому для расчета ΣQ_d^* нельзя безоговорочно использовать коэффициенты перехода для прямой радиации, как это обычно рекомендуется в литературе [19, 20, 66, 77, 93 и др.].

За вегетационный период с температурой воздуха выше 10 °С к горизонтальной поверхности поступает 41,5 % общей годовой суммы Q_d . Причем за три летних месяца приходит 74 % и около 20 % в течение мая после перехода средней суточной температуры через 10 °С (табл. 24).

Для всех склонов произвольной ориентации наблюдается уменьшение ΣQ_d^* по мере возрастания крутизны. Из этого следует, что рассеянная радиация сглаживает характерный для южных экспозиций максимум инсоляции для среднекрутых склонов. При равной крутизне минимальные ΣQ_d^* поступают к северным склонам, причем наибольшие различия отмечаются при $B_c = 40^\circ$. По абсолютной величине $\Delta \Sigma Q_d^*$ достигает 15 ккал/(см²·период). В пределах одной экспозиции наибольшие различия между пологими и крутыми склонами формируются на северных склонах (около 12 ккал/(см²·период), минимальные характерны для южных склонов (4 ккал/(см²·период)).

Холодный период года характеризуется относительно малым приходом суммарной радиации: к горизонтальной поверхности поступает всего 15 % годовой суммы Q_d (табл. 24).

Особенностью зимнего режима является, во-первых, сокращение различий в ΣQ_d^* для склонов разной крутизны северной, восточной и западной экспозиций. Для северных склонов разной крутизны, например, в этот период различия сокращаются вдвое по сравнению с вегетационным периодом. Наоборот, различия между пологими и крутыми южными склонами зимой возрастают почти в 2 раза. Для юго-восточных и юго-западных склонов относительное изменение ΣQ_d^* с крутизной в этот период аналогично изменению в теплый период. Во-вторых, к крутым южным склонам поступает больше суммарной радиации, чем к пологим, т. е. наблюдается тенденция, обратная тенденции вегетационного периода. Эта особенность распределения ΣQ_d^* полностью обусловлена режимом инсоляции склонов.

Для холодного периода характерно увеличение различий в ΣQ_d^* между экстремальными ситуациями. Между крутыми южными и северными склонами $\Delta \Sigma Q_d^*$ составляет 23 ккал/(см²·период), т. е. амплитуда в 1,5 раза выше, чем за вегетационный период.

Коэффициент K'_Q при средних многолетних условиях облачности на $\varphi = 44^\circ$. Юг Приморского края

A_c	B_c°	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
С	20	0,47	0,59	0,72	0,90	0,94	0,92	0,91	0,89	0,77	0,66	0,50	0,44
	40	0,36	0,34	0,40	0,59	0,67	0,79	0,75	0,80	0,47	0,42	0,33	0,37
СВ	20	0,63	0,70	0,78	0,87	0,91	0,93	0,92	0,91	0,83	0,75	0,65	0,61
	40	0,42	0,48	0,62	0,68	0,72	0,78	0,77	0,74	0,61	0,53	0,42	0,41
В	20	0,96	0,95	0,93	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,98	0,96	0,96	0,96
	40	0,88	0,87	0,84	0,85	0,82	0,82	0,82	0,82	0,85	0,86	0,88	0,89
ЮВ	20	1,30	1,19	1,08	1,03	1,00	0,97	0,98	1,00	1,08	1,16	1,28	1,33
	40	1,47	1,31	1,08	0,98	0,89	0,87	0,88	0,92	1,06	1,20	1,43	1,53
Ю	20	1,45	1,15	1,13	1,07	1,01	0,99	0,99	1,02	1,13	1,24	1,42	1,49
	40	1,77	1,50	1,18	0,96	0,94	0,89	0,90	0,95	1,15	1,36	1,78	1,79
ЮЗ	20	1,31	1,21	1,07	1,03	1,00	0,98	0,99	1,01	1,08	1,15	1,28	1,32
	40	1,48	1,31	1,07	0,98	0,91	0,88	0,89	0,93	1,06	1,20	1,43	1,57
З	20	1,01	0,96	0,93	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,96	0,96	0,96
	40	0,88	0,88	0,83	0,85	0,79	0,83	0,84	0,84	0,85	0,86	0,88	0,89
СЗ	20	0,63	0,71	0,78	0,87	0,91	0,93	0,93	0,91	0,83	0,76	0,64	0,62
	40	0,42	0,48	0,57	0,68	0,72	0,78	0,78	0,74	0,61	0,53	0,42	0,42

Таблица 24

Действительные суммы суммарной радиации (ккал/см²), поступающие к поверхности открытых склонов за различные периоды года (средние многолетние данные). Юг Приморского края, $\varphi = 44^\circ$

Горизонтальная поверхность	B_c°	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Вегетационный период ($t_n \geq 10^\circ\text{C}$)									
49,03*	10	46,9	47,3	47,7	49,4	49,9	49,6	48,4	47,4
	20	44,4	44,7	46,8	48,8	49,5	49,1	47,2	44,9
	30	39,8	41,0	43,9	46,9	48,3	47,5	44,5	41,3
	40	34,7	36,5	40,3	44,4	46,0	45,0	41,0	36,8
Холодный период									
18,00	10	13,7	15,0	17,9	20,9	21,6	21,0	17,8	15,0
	20	9,3	11,9	17,3	22,8	24,1	22,9	17,2	12,0
	30	7,0	9,6	16,7	24,5	27,9	24,7	16,4	9,6
	40	6,4	8,0	15,9	24,5	30,0	25,8	15,4	8,1

* $\sum Q_d$ за вегетационный период с $t_n > 10^\circ\text{C}$ примерно на 5 ккал/см² меньше, чем аналогичные данные, приведенные в [20, 21]. Учитывая хорошую сходимость месячных расчетных и средних многолетних $\sum Q_d$ (см. табл. 18), можно полагать, что выявленные различия могут быть следствием разных оценок продолжительности вегетационного периода. В наших расчетах учитывался период с 20 мая по последнюю декаду сентября. В [21] продолжительность периода не указана.

В целом к склонам южных экспозиций за зиму поступает только в 2 раза меньше радиации, чем в теплый период. Для северных склонов характерно более резкое снижение $\sum Q_d^*$: для крутых почти в 6 раз, для пологих — в 4 раза. По абсолютной величине $\sum Q_d^*$ на южных склонах приближаются к $\sum Q_0$ на $\varphi = 37 \div 40^\circ$, на северных крутых они близки к аналогичным величинам на $\varphi = 60 \div 62^\circ$ [121].

Весенний и осенний переходные периоды характеризуются малооблачной погодой и высокой прозрачностью атмосферы. Это определяет довольно большие суммы суммарной радиации, поступающие к подстилающей поверхности. В течение весны к горизонтальной поверхности приходит около 25 % годовой суммы, осенью — около 18 %.

В переходные периоды наблюдаются очень малые различия в количестве тепла между склонами южной экспозиции разной крутизны (менее 1 ккал/(см²·период)) и значительные различия в $\sum Q_d^*$ (до 10 ккал/(см²·период)) между пологими и крутыми северными склонами. Для северных, восточных и западных склонов сохраняются тенденции в изменении $\sum Q_d^*$, отмеченные в другие периоды года [43].

При равной крутизне минимум $\sum Q_d^*$ поступает к северным склонам. Причем наибольшая разница в $\sum Q_d^*$ между крутыми северными и южными склонами достигает 15 ккал/(см²·период). Эта величина на 73 % больше амплитуды за вегетационный период и в 1,5 раза меньше амплитуды за холодный период. Разница в приходе суммарной радиации между экстремальными поверхностями сравнима с географическими различиями в $\sum Q_0$ на $\varphi = 75 \div 55^\circ$ [121].

Таким образом, преимущество южных склонов по сравнению с горизонтальной поверхностью проявляется только в зимний и переходные периоды. Режим облученности на южных склонах именно в эти периоды определяет приращение годовых сумм Q_d^* на 12 % (для возможных сумм аналогичное приращение составляет 18 % от $\sum Q_0$ для горизонтальной поверхности). На северных склонах годовая $\sum Q_d^*$ на 44 % ниже, чем на горизонтальной поверхности. В целом за год к поверхности южных склонов приходит суммарной радиации столько, сколько поступает на горизонтальную поверхность на $\varphi = 30 \div 40^\circ$. Аналогом северных пологих склонов по годовым $\sum Q_d^*$ является горизонтальная поверхность на $\varphi = 50^\circ$, крутых — севернее 60° [121].

Радиационный баланс. Суммы радиационного баланса за вегетационный период при средних многолетних условиях облачности рассчитывались на основе линейной зависимости между радиационным балансом B и суммарной радиацией

$$B = aQ + b. \quad (21)$$

Использование подобных зависимостей дает приближенные оценки радиационного баланса склонов, так как при этом не учитываются расходные части баланса (и прежде всего эффективное излучение). Однако, как показано в ряде работ [58, 72, 93, 166, 172 и др.], расхождение между расчетными дневными суммами B (по уравнению регрессии) и измеренными не превышает 2,5—5,0 %. Подобные расхождения находятся в пределах точности измерения радиационного баланса.

Для юга Приморского края коэффициенты a и b были получены В. П. Некрасовым [125] по материалам сетевых наблюдений и собственных измерений в бассейне р. Зеркальной. Коэффициент b рассчитывался с учетом среднего многолетнего суточного и годового хода облачности. Влияние облачности на величину b корректировалось по графикам связи между B и Q для различных режимов облачности [125]. При облачности 10/10 $b = -0,01$ ккал/(см²·мин), при ясной погоде $b = -0,07$ ккал/(см²·мин). При средних за вегетационный период условиях облачности $b = -0,035$ ккал/(см²·мин) и в сумме за весь этот период $\bar{b} = -6,1$ ккал/см² и $\bar{a} = 0,78$. Для прибрежных районов $\bar{a} = 0,70$ и $\bar{b} = -7,0$ ккал/(см²·период). Расхождение между рассчитанными суммами радиационного баланса горизонтальной поверхности $B_{г.п}$ и фактическими, полученными на сети актинометрических станций, не превышает 5 % [125].

Как отмечалось выше, следствием летнего муссона является снижение $\sum Q_d$ до уровня много ниже, чем возможный приход на $\varphi = 44^\circ$. В то же время увеличение облачности в летний период способствует формированию минимума эффективного излучения подстилающей поверхности. Результирующим следствием влияния облачности является компенсация снижения приходной части баланса за счет уменьшения его расходных составляющих. Поэтому $\sum B_{г.п}$ за вегетационный период на территории юга Приморского края в более континентальных районах (при удалении от побережья на 40—50 км) несколько превышают средние данные для $\varphi = 44^\circ$ (для этой широты $\sum B_{г.п} = 31,7$ ккал/(см²·период) [121, 151]) и приближаются к средним значениям $\sum B_{г.п}$ на $\varphi = 38 \div 40^\circ$ (табл. 25).

В прибрежной полосе $\sum B_{г.п}$ снижаются до величин, характерных для более высоких φ . Последнее связано с тем, что на побережье интенсивное ослабление суммарной радиации облачностью не компенсируется уменьшением эффективного излучения.

Совместное влияние удаленности от побережья и рельефа определяет особенности радиационного баланса склонов. Независимо от географического положения точки максимальное значение $\sum B^*$ наблюдается на южных склонах крутизной 10°

Таблица 25

Суммы радиационного баланса за вегетационный период на $\varphi = 44^\circ$ при средних многолетних условиях облачности (ккал/(см² · период)). Подстилающая поверхность — травяно-кустарниковая растительность [125]

Горизонтальная поверхность	B_c	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Удаленность от побережья 0—2 км									
26,7	10	25,0	25,4	26,0	27,0	27,3	27,0	25,7	25,7
	20	23,8	24,8	26,0	26,3	27,0	26,7	25,4	23,7
	30	20,3	21,4	23,2	25,0	26,0	25,7	23,8	23,2
	40	16,9	18,0	20,7	23,8	24,4	23,8	21,1	18,3
Удаленность от побережья 40—50 км									
32,2	10	30,5	30,8	31,7	32,5	32,9	32,6	31,2	30,9
	20	28,6	28,7	30,1	32,0	32,7	32,2	30,7	28,9
	30	25,1	25,9	28,2	30,6	31,6	30,9	28,5	26,0
	40	21,5	22,3	25,2	28,8	29,8	28,7	25,2	22,6

($K_B = 1,02$)¹, минимальное ($K_B = 0,64$) — на северных крутизной 40° . Но по абсолютной величине максимум на южных склонах в прибрежной полосе сравним с летними $\sum B_{г.п}$ на $\varphi = 58^\circ$, а в более континентальных районах — на $\varphi = 36 \div 38^\circ$. Аналогом северных крутых склонов на побережье является горизонтальная поверхность на $\varphi > 70^\circ$, при удалении от побережья — на $\varphi = 66 \div 68^\circ$ (примерно район Хибин) [121, 141]. В близких по теплообеспеченности условиям в прибрежной и относительно континентальной части территории на широте 44° находятся склоны различных экспозиций (табл. 25). Так, например, $\sum B^*$ на побережье для пологих и среднекрутых склонов, развернутых к югу, равны $\sum B^*$ для среднекрутых северных склонов в районах, удаленных от побережья, и т. п. Кроме того, по мере увеличения континентальности возрастают амплитуды $\sum B^*$ между экстремальными поверхностями.

Приведенные оценки $\sum B$ являются сугубо ориентировочными. Их нельзя распространять на другие типы подстилающей поверхности, в том числе и на облесенные склоны. Масштаб влияния деятельной подстилающей поверхности можно оценить исходя из данных Ю. Л. Раунера [133] о соотношении месячных $\sum B_{г.п}$ для луговой и лесной растительности. При коэффи-

¹ По данным К. П. Березникова и Л. М. Крамера [21], для южных склонов крутизной 10° в вегетационный период $K_B = 1,05$ и увеличивается до 1,10 для склонов крутизной 20° .

циенте корреляции 0,95 эта зависимость в период с положительным радиационным балансом аппроксимируется уравнениями регрессии:

для хвойных лесов

$$B_{л} = 1,1B_{тр} + 35 \text{ (ккал/(см}^2 \cdot \text{сут))}, \quad (22)$$

для лиственных и смешанных лесов (выше III бонитета)

$$B_{л} = 1,05B_{тр} + 30 \text{ (ккал/(см}^2 \cdot \text{сут))}, \quad (23)$$

где $B_{л}$ — радиационный баланс лесной растительности, $B_{тр}$ — луговой растительности.

Если считать соотношения (22) и (23) справедливыми для различных географических зон [133], то $\sum B_{г.п}$ в относительно континентальных районах юга Приморского края при наличии лиственного леса возрастает на 22%, хвойного — на 25%. Соответственно увеличиваются $\sum B^*$ для облесенных склонов.

Таким образом, на юге Приморского края в пределах небольших территорий из-за расчлененности рельефа формируются существенные различия в приходе прямой и суммарной радиации. Склоны одной горной долины могут находиться в условиях, типичных для принципиально разных климатических зон, — от полярных областей до субтропиков. Региональной особенностью распределения радиации между склонами является нивелировка пространственных градиентов (на фоне относительно низких для $\varphi = 44^\circ$ сумм радиации) в течение вегетационного периода. В это время года приход суммарной интегральной радиации и ФАР близок к количеству радиации на широтах $58 \div 60^\circ$. Более существенные различия наблюдаются в начале периода вегетации (весной) и в зимние месяцы. Региональным признаком также является компенсация снижения в летний период прихода радиации за счет уменьшения эффективного излучения подстилающей поверхности. Это способствует формированию повышенных сумм B по сравнению со средними величинами для $\varphi = 44^\circ$. Однако между склонами сохраняются значительные контрасты. В пределах одной долины различно экспонированные поверхности находятся в условиях, сравнимых по энергообеспеченности с горизонтальными поверхностями, удаленными на сотни и тысячи километров.

1.5.2.2. Юго-Западный Тянь-Шань (климатическая горная область Тянь-Шаня)

Согласно климатическому районированию, провинция Юго-Западный Тянь-Шань (рис. 16) Приферганской физико-географической области [159] входит в климатическую область Западный Тянь-Шань [11, 12, 28, 168]. Эта область относится к северной окраине зоны южных пустынь субтропического пояса с умеренно теплым летом и умеренно мягкой зимой. Среднегорная зона (от 1200—2000 до 2500—3000 м) относится

к теплому климату лесостепей и степей. Отдельные участки этой зоны, для которых характерно большое количество осадков (западные склоны Угамского, Пекемского и Ферганского хребтов), относятся к влажному и теплому климату широколиственных лесов.

Основное направление влагонесущих воздушных масс (с запада и юго-запада) связано с циклонами иранской ветви поляр-

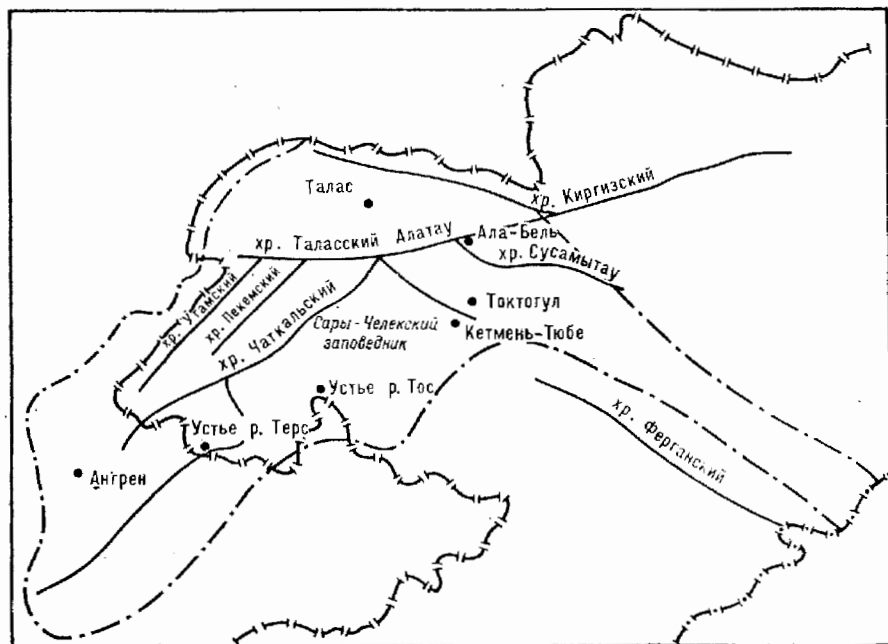


Рис. 16. Климатическая область Западный Тянь-Шань (показана штрих-пунктирной линией).

ного фронта и постоянными влажными течениями в более высоких слоях атмосферы. Поэтому на фоне высотной зональности пространственные градиенты климатических характеристик в значительной степени определяются ориентацией горных хребтов к путям переноса воздушных масс.

В летний период при перемещении планетарной высотной фронтальной зоны в более высокие широты над южными пустынями уже со второй половины мая устанавливается ясная жаркая и сухая погода, которая длится в течение пяти месяцев. Первая половина лета (июнь, начало июля) характеризуется достаточным количеством осадков (в июне выпадает 75 мм) и низкими ночными минимумами температур (10°C и ниже). Летняя засуха начинается со второй половины июля. С усиле-

нием процессов трансформации во второй половине лета количество облачности уменьшается, достигая минимума в августе—сентябре. По всей территории Западного Тянь-Шаня возрастает коэффициент устойчивости ясной погоды (табл. 26), причем повторяемость пасмурного неба по нижней облачности повсеместно не превышает 5—10 %.

Таблица 26

Коэффициент устойчивости ясной погоды $K_{\text{п}}$ по общей облачности в теплый период на территории Западного Тянь-Шаня (средние многолетние данные)

Станция	И м	V	VI	VII	VIII	IX
Кетмень-Тюбе	802	45	82	77	85	82
Кировское	855	54	61	78	83	81
Ак-Терек-Гава	1748	51	60	74	84	84
Устье р. Терс	1759	50	61	84	90	92
Чаткал	1937	54	53	73	88	82
Сусамыр	2061	48	43	58	74	76
Ак-Таш	2150	52	46	62	65	64
Ангрен	2286	50	62	78	89	82
Ало-Бель	3212	55	34	60	68	92

Южное положение провинции определяет высокую потенциальную величину прихода радиации. В течение теплого периода при равной прозрачности атмосферы $\sum S_0$ здесь на 1,5—7 % выше, чем на $\varphi=44^\circ$, причем эти различия увеличиваются по мере уменьшения δ_{\odot} .

Региональной особенностью являются также значительные высоты, в связи с чем, в отличие от Среднего Сихотэ-Алиня, здесь резко проявляется вертикальный профиль $\sum S_0$ и $\sum Q_0$. В диапазоне $H=500-3500$ м увеличение p_2 от 0,72 до 0,84 способствует приращению $\sum S_0$ на 20—25 %, $\sum Q_0$ — на 11—14 %. При этом вертикальные градиенты увеличиваются в конце теплого периода. В целом совместное влияние p и δ_{\odot} в большей степени проявляется на северных крутых склонах, а на южных — на пологих склонах во всех высотных поясах. Причем на последних $\Delta \sum S_0^*$ в июне почти в 10 раз больше, чем в сентябре.

При действительных условиях облачности доля прямой радиации в суммарном потоке снижается до 59—85 % по сравнению с 60—91 % при безоблачном небе. Влияние облачности проявляется также в сдвиге максимума прихода радиации на вторую половину лета (табл. 27), при этом наибольшее ослабление $\sum S_0$ и $\sum Q_0$ происходит в мае. Однако это ослабление существенно меньше, чем в летний период на территории юга Приморского края. В первую половину лета разница в ослаблении S_0 и Q_0 облачностью составляет 12—14 %, во вторую

Таблица 27
 Действительные суммы радиации на горизонтальную поверхность за теплый период на $\varphi = 41,5^\circ$ (ккал/(см²·мес)). Юго-Западный Тянь-Шань

Месяц	Характеристика	H м				
		1000—1400	1400—1600	1600—1800	1800—2000	2000—2500
Май	$\sum S'_d$	11,1	11,2	11,4	11,7	12,1
	$\sum S'_d / \sum S'_0 \%$	58	59	59	58	58
	$\sum Q_d$	16,4	16,8	17,3	17,6	18,4
	$\sum Q_d / \sum Q_0 \%$	72	72	73	73	74
	$\sum Q_{d \text{ ФАР}}$	7,8	8,0	8,3	8,4	8,8
Июнь	$\sum S'_d$	12,4	13,4	13,6	13,0	13,4
	$\sum S'_d / \sum S'_0 \%$	64	67	67	63	63
	$\sum Q_d$	17,7	18,2	18,5	18,4	18,9
	$\sum Q_d / \sum Q_0 \%$	78	79	79	78	78
	$\sum Q_{d \text{ ФАР}}$	8,4	8,5	8,6	8,7	8,9
Июль	$\sum S'_d$	13,2	14,4	14,7	13,6	14,0
	$\sum S'_d / \sum S'_0 \%$	72	77	77	70	70
	$\sum Q_d$	18,8	19,7	20,0	19,5	19,8
	$\sum Q_d / \sum Q_0 \%$	83	86	86	83	83
	$\sum Q_{d \text{ ФАР}}$	8,9	9,2	9,4	9,2	9,3
Август	$\sum S'_d$	13,1	14,8	15,6	14,9	15,4
	$\sum S'_d / \sum S'_0 \%$	77	83	86	80	80
	$\sum Q_d$	17,3	18,3	18,6	18,0	18,7
	$\sum Q_d / \sum Q_0 \%$	87	89	89	86	87
	$\sum Q_{d \text{ ФАР}}$	8,0	8,4	8,4	9,2	8,5
Сентябрь	$\sum S'_d$	10,2	11,1	11,3	10,7	11,1
	$\sum S'_d / \sum S'_0 \%$	80	84	84	78	78
	$\sum Q_d$	13,9	14,5	14,7	14,4	14,7
	$\sum Q_d / \sum Q_0 \%$	88	89	90	87	87
	$\sum Q_{d \text{ ФАР}}$	6,5	6,7	7,0	6,7	6,8
Май—сентябрь, ккал/(см ² ·период)	$\sum Q_{d \text{ ФАР}}$	39,6	40,8	41,7	41,2	42,3

Примечание. $\sum Q_{d \text{ ФАР}}$ рассчитывались по формуле (20).

половину роль рассеянной радиации в формировании суммарного потока снижается и различия в $\sum S'_d / \sum S'_0$ и $\sum Q_d / \sum Q_0$ нивелируются (табл. 27).

Региональные особенности вертикального профиля облачности (см. рис. 10) обуславливают незначительные изменения $\sum S'_d / \sum S'_0$ и $\sum Q_d / \sum Q_0$ с высотой: в течение одного месяца различия между высотными поясами не превышают 3—7 %.

Вертикальные градиенты радиации при действительных условиях облачности значительно ниже, чем при возможных. Так, в диапазоне высот 1000—2500 м градиент $\sum S'_d$ изменяется от 1,70 ккал/(см²·сут) на 100 м (в июле) до 4,94 ккал/(см²·сут) в августе и в среднем за теплый период равен 2,66 ккал/(см²·сут). Максимальная величина вертикального градиента $\sum Q_d$ отмечается в мае (4,29 ккал/(см²·сут) и минимальная — в сентябре (1,77 ккал/(см²·сут)). Среднее за теплый период значение вертикального градиента $\sum Q_d$ (равное 2,83 ккал/(см²·сут) на 100 м) хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [26] для условий Кавказа и Средней Азии.

Приращение $\sum S'_d$ в интервале $H=1000 \div 2500$ м в среднем составляет 7—8 %, приращение $\sum Q_d$ — 5—8 %. В отличие от возможных сумм, это увеличение практически не зависит от δ_\odot . Так, максимальное увеличение $\sum S'_d$ (17,6 %) отмечается в августе, а $\sum Q_d$ (12,2 %) — в мае, т. е. сезонные изменения вертикального профиля облачности перекрывают по значимости влияние астрономических факторов и прозрачности атмосферы.

В целом совокупное влияние астрономических факторов, прозрачности атмосферы и рельефа при действительных условиях облачности обуславливают те же закономерности в распределении $\sum S'_d$ и $\sum Q_d$, которые отмечались для условий безоблачного неба (см. рис. 5). Однако облачность способствует сглаживанию пространственных градиентов радиации. Так, например, экстремальные различия в $\sum S'_d$ между северными и южными склонами в июне соизмеримы с межширотными градиентами $\sum S'_d$ между 56 и 43° с. ш. При уменьшении δ_\odot эти различия возрастают и $\Delta \sum S'_d$ в сентябре примерно равна 11—12 ккал/(см²·мес), что соответствует изменениям инсоляции горизонтальной поверхности при $\Delta \varphi = 20^\circ$. В то же время для $\sum S'_0$ экспозиционные различия соизмеримы с $\Delta \sum S'_0$ при изменении широты на 30 — 35° . Абсолютные величины $\sum Q_d$ на северных крутых склонах в середине лета равны $\sum Q_d$ на широте 50° . Максимальные $\sum Q_d$ в этот период на южных пологих склонах много выше, чем $\sum Q_d$ на горизонтальную поверхность на $\varphi = 38$ — 40° . В сентябре различия в экстремальных величинах $\sum Q_d$ увеличиваются до 4—5 ккал/(см²·мес) и соизмеримы с географическими изменениями $\sum Q_d$ в интервале 38 — 68° с. ш.

Таким образом, влияние облачности в климатической области Западный Тянь-Шань на приход радиации прежде всего проявляется: 1) в смещении максимума за теплый период на вторую половину лета, когда над районом устанавливается термическая депрессия; 2) в сокращении сумм радиации по сравнению с возможными на 40—30 % (первая половина теплого периода) и на 20—10 % (вторая половина теплого периода); 3) в уменьшении доли прямой радиации в общем суммарном потоке в среднем на 10 % по сравнению с безоблачным небом; 4) в снижении пространственных различий (при сохранении тех же тенденций, что и для возможной радиации) в суммах радиации, приходящих к склонам.

1.5.2.3. Западный Саян (климатическая горная область Алтая и Саян)

К Западному Саяну относится горная область между Алтаем и Восточным Саяном, расположенная в интервале широт $53^{\circ}40'$ — $51^{\circ}20'$. На севере Западный Саян простирается до Минусинской, а на юге — до Тувинской котловины, с запада граница проходит по верховьям р. Абакан, на востоке — по верховьям р. Кандат. Западный Саян совместно с Алтаем и Восточным Саяном входит в горную Алтайско-Саянскую область зоны умеренно континентального климата [11, 12].

В отличие от Сихотэ-Алиня, три магистральные цепи хребтов Западного Саяна имеют широтное направление, что способствует формированию климатических контрастов между северным и южным макросклонами. По степени увлажнения и континентальности климата Д. И. Назимова [109] выделяет в пределах Западного Саяна три лесорастительные провинции (рис. 17): Северную Алтайско-Саянскую, Хакасскую и Южную Алтайско-Саянскую. В первую провинцию входят две группы районов: I — циклонические избыточно влажные районы (северная наветренная часть Западного Саяна), II — циклонические умеренно влажные (осевая часть Западного Саяна). К Хакасской провинции (расположенной в ветровой тени Абаканского хребта и Кузнецкого Алатау) относятся антициклонические умеренно влажные районы — группа III (подветренные части хребтов северного макросклона и частично южный макросклон). Южная Алтайско-Саянская провинция составляет IV группу антициклонических резко континентальных недостаточно влажных районов. К ним относится самая сухая западная часть южного макросклона (плато Алаш) и межгорные котловины со стороны южного макросклона.

В силу разнообразия климатических условий Западного Саяна суммы радиации за период май—сентябрь были рассчитаны отдельно для климатических провинций с учетом высотной поясности.

Следует подчеркнуть, что в горах Западного Саяна вообще нет актинометрических станций. Существуют только две равнинные станции: Хакасская и Кызыл, первая из которых расположена со стороны северного макросклона на высоте 254 м, а вторая — со стороны южного макросклона в обширной горной котловине на высоте 626 м. Для собственно горной части имеются данные эпизодических наблюдений за 3—4 года (май—сентябрь), полученные Е. А. Садовничей и Н. М. Чебаковой. Результаты этих наблюдений в нескольких точках северного и

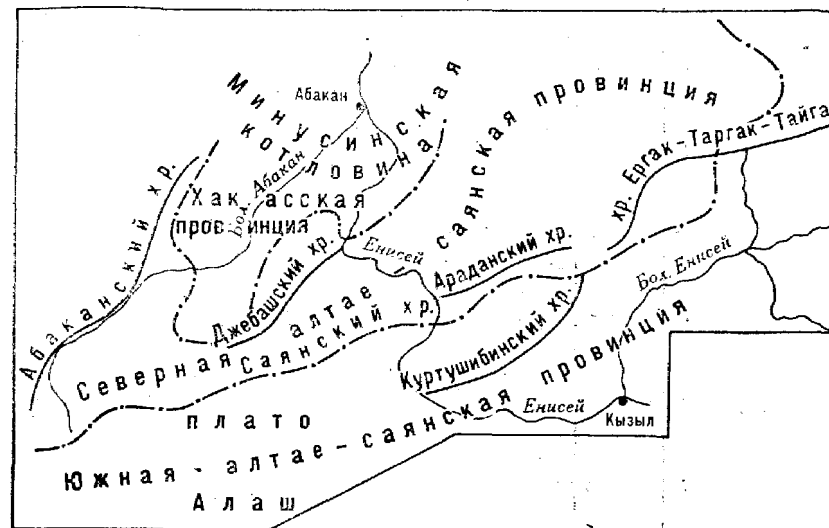


Рис. 17. Схема лесорастительного районирования Западного Саяна [109].

южного макросклонов после приведения к многолетнему ряду послужили основой для оценки вертикальных градиентов возможных и действительных сумм радиации [142, 143].

Исходные данные о суммах прямой радиации на наклонные поверхности при безоблачном небе были получены нами с помощью изложенной в п. 1.2 расчетной схемы для $\varphi = 52,7^{\circ}$.

Действительные суммы радиации при средних многолетних условиях облачности рассчитывались совместно для I и II районов и отдельно для III и IV районов. Объединение I и II районов проведено в связи с однотипностью в них циркуляционных процессов и режима облачности в теплый период [143].

В нижних высотных поясах $\sum S_{\perp}$ снижаются до 48—54 % и на осевой части хребтов до 36—42 % от $\sum S_0$. Суммарная радиация составляет 71—74 % в нижнем поясе и 62—66 % от $\sum Q_0$ в верхнем поясе. Доля прямой радиации в суммарном потоке для южного макросклона примерно на 10 % выше, чем для

северного. Сезонный ход облачности [143, 150] сглаживает июньский максимум $\sum S'_0$ и $\sum Q_0$, в результате чего период с наибольшим приходом радиации на горизонтальную поверхность длится в течение июня—июля (рис. 18).

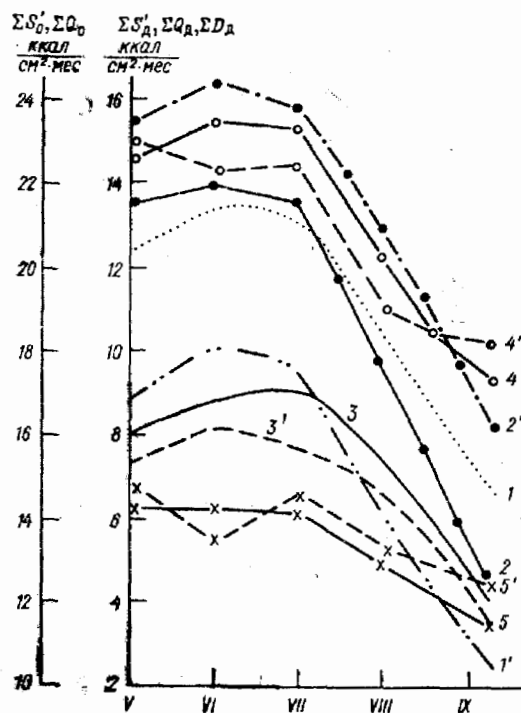


Рис. 18. Изменение прямой, рассеянной и суммарной радиации в течение теплого периода года на высотах 500 м (1, 2, 3, 4, 5) и 2000 м (1', 2', 3', 4', 5').
1) $\sum S'_0$, 2) $\sum Q_0$, 3) $\sum S'_д$, 4) $\sum Q_д$, 5) $\sum D_д$.

Во всех климатических районах в диапазоне высот до 2000 м происходит снижение $\sum S'_д$ и $\sum Q_д$ с высотой. Только в сентябре наблюдается возрастание $\sum Q_д$, связанное с уменьшением количества облачности нижнего яруса. При действительных условиях облачности происходит смена знаков вертикальных градиентов при уменьшении самих градиентов (табл. 28). Максимальные градиенты отмечаются в июле в период наибольшего развития конвективной облачности.

Существенные различия в $\sum S'_д$ и $\sum Q_д$ за вегетационный период возникают за счет изменения его продолжительности.

Таблица 28

Вертикальные градиенты прямой и суммарной радиации при средних многолетних условиях облачности (кал/(см²·сут) на 100 м) (по данным [143])

Макросклон	Характеристика	V	VI	VII	VIII	IX
Северный (I, II и III районы)	$\Delta \sum S'_д$	-0,86	-1,55	-3,22	-2,36	-0,22
	$\Delta \sum S'_д / \Delta \sum S'_0 \%$	11,1	22,1	45,3	31,8	3,0
	$\Delta \sum Q_д$	0,43	-2,0	-1,93	-2,15	2,22
	$\Delta \sum Q_д / \Delta \sum Q_0 \%$	8,9	40,0	37,4	37,0	37,0
Южный (IV район)	$\Delta \sum S'_д$	-2,77	-0,67	-4,95	-3,44	-0,44
	$\Delta \sum S'_д / \Delta \sum S'_0 \%$	61,2	13,4	102,2	59,2	7,8
	$\Delta \sum Q_д$	0,21	-0,67	-1,07	-0,22	1,55
	$\Delta \sum Q_д / \Delta \sum Q_0 \%$	5,0	15,4	25,5	4,6	33,2

На высотах около 500 м продолжительность периода с $t_v \geq 10^\circ\text{C}$ на южном макросклоне примерно на 20 дней больше, чем на северном. На высотах 800—1000 м эта разница сокращается до 12—8 дней [150] в основном за счет сдвига весенней даты перепада температуры через 10°C . На общем фоне снижения $\sum S'_д$ и $\sum Q_д$ с высотой при меньших различиях в продолжительности периода вегетации относительное сокращение сумм радиации на северном макросклоне (по сравнению с южным) проявляется более интенсивно в верхних высотных поясах (табл. 29).

Таблица 29

Относительное снижение $\sum S'_д$ и $\sum Q_д$ в I, II и III районах за вегетационный период с $t_v \geq 10^\circ\text{C}$ по сравнению с IV районом (%)

II м	$\sum S'_д$ ккал/(см² × период), IV район	$\Delta \sum S'_д \%$		$\sum Q'_д$ ккал/(см² × период), IV район	$\Delta \sum Q'_д \%$	
		I, II районы	III район		I, II районы	III район
500	37,2	-22,8	-16,7	59,9	-18,5	-22,0
1000	27,4	-24,5	-17,8	47,8	-26,4	-19,9
1500	17,5	-31,1	-21,1	32,8	-33,8	-25,6

Дополнительное влияние облачности на ΣS_d^* (по сравнению с ΣS_d) проявляется в изменении дневного хода часовых ΣS_d^* и соответственно в соотношении дополуленных и послеполуденных сумм, характерном для ΣS_0^* (табл. 30). Причем некоторое увеличение облачности во вторую половину дня в середине лета, не нарушая общего характера дневного хода ΣS_d^* , обуславливает снижение дневных сумм на склонах с западной составляющей (рис. 19).

Таблица 30

Радиационные характеристики склонов при безоблачном небе и действительных условиях облачности. Западный Саян ($\delta_{\odot} = 23^{\circ}$, $\varphi = 52,7^{\circ}$)

Характеристика	СВ	СЗ	В	З	ЮВ	ЮЗ
Крутизна склона 20°						
$\Sigma S_{0\text{дп}}^*$ %	63,0	37,0	65,8	34,2	60,0	40,0
$\Sigma S_{d\text{дп}}^*$ %	64,1	38,5	67,3	34,7	61,6	40,5
$\Sigma S_0^*/\Sigma Q_0^*$	0,86		0,86		0,87	
$\Sigma S_d^*/\Sigma Q_d^*$	0,48	0,47	0,50	0,49	0,52	0,51
K_s	0,87		0,94		1,02	
K'_s	0,87	0,84	0,95	0,92	1,02	1,00
K_Q	0,88		0,94		1,01	
K'_Q	0,92	0,90	0,96	0,94	0,99	0,98
Крутизна склона 40°						
$\Sigma S_{0\text{дп}}^*$ %	81,0	19,0	79,0	21,0	68,0	32,0
$\Sigma S_{d\text{дп}}^*$ %	82,5	18,8	81,5	19,7	70,3	33,6
$\Sigma S_0^*/\Sigma Q_0^*$	0,82		0,86		0,88	
$\Sigma S_d^*/\Sigma Q_d^*$	0,43	0,41	0,50	0,48	0,53	0,52
K_s	0,63		0,83		0,95	
K'_s	0,65	0,61	0,85	0,81	0,96	0,95
K_Q	0,66		0,84		0,94	
K'_Q	0,76	0,74	0,87	0,84	0,92	0,92

Примечание. Индекс «дп» — дополуленные суммы радиации.

Относительный приход прямой радиации при реальных условиях облачности на склоны с северной и западной составляющими меньше, чем при безоблачном небе. Обратное соотношение коэффициентов K'_s и K_s наблюдается для склонов с восточной и южной составляющими. Различия между K'_s и K_s лежат в пределах 0,01—0,03 (табл. 30). Относительное приращение ΣQ_d^* не адекватно приращению (снижению) ΣS_d^* и ΣQ_0^* : разница между K'_Q и K_Q может достигать для крутых склонов, развернутых на север, 0,06—0,10. Величина K'_Q очень мало варьирует в зависимости от климатического района, в большей степени ее различия выражены между высотными поясами, которые возрастают при уменьшении δ_{\odot} . На период летнего солнцестояния высотные различия в K'_Q нивелируются (за исключением южных склонов IV группы районов).

На больших высотах в сентябре склоны с северной составляющей

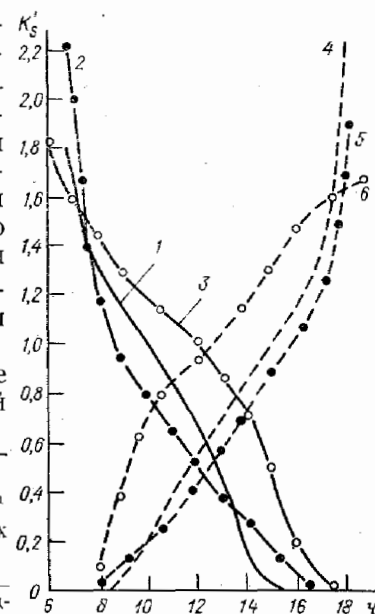


Рис. 19. Дневной ход K'_s для середины лета в условиях Западного Саяна на склонах крутизной 20° .

Склоны: 1 — восточные, 2 — северо-восточные, 3 — юго-восточные, 4 — западные, 5 — северо-западные, 6 — юго-западные.

получают примерно на 10% меньше радиации, чем горизонтальная поверхность, по сравнению с нижними высотными поясами. В июне относительное поступление радиации с высотой несколько увеличивается (примерно на 2—3%). На южных склонах наблюдаются обратные тенденции изменения K'_Q с высотой. Таким образом, вертикальный профиль K'_Q на склонах разной экспозиции аналогичен тем изменениям, которые характерны для его широтного профиля [93]. Снижение K'_Q на северных склонах с высотой подобно снижению K'_Q в более высоких широтах и т. п.

При действительных условиях облачности экспозиция склонов в большей степени определяет изменение пространственных градиентов ΣQ_d^* , чем высота над уровнем моря. Так, например, между нижними и верхними высотными поясами наибольшие различия в ΣQ_d , характерные для IV группы районов, не

превышают 3 ккал/см² за период май—сентябрь. В то же время в одном высотном поясе разница между экстремальными условиями (южные склоны 30° и северные 40°) достигает 42—46 ккал/см² за май—сентябрь, т. е. более чем в 10 раз превышает максимальные высотные градиенты между одинаковыми поверхностями.

Если сравнить экстремальные $\sum Q_d^*$ с $\sum Q_d$ в период май—сентябрь на различных φ , то выявляются следующие аналогии: $\sum Q_d^*$ на южных склонах равны $\sum Q_d$ на $\varphi=43\div 45^\circ$, а $\sum Q_d^*$ на северных склонах несколько ниже $\sum Q_d$ за три летних месяца на широте Хибин. Отношение $\Delta \sum Q_d$ к $\sum Q_d$ для условий Западного Саяна в среднем составляет 62—63% и превышает подобные отношения для южных широт. Отсюда следует, что роль экспозиционного фактора усиливается по мере увеличения широты.

За вегетационный период с $t_v \geq 10^\circ\text{C}$ во влажных циклонических районах суммы ФАР на северном макросклоне составляют 85—51% от суммы ФАР в экстремально сухих районах, причем различия в обеспеченности радиацией снижаются по мере увеличения высоты. Высотный пояс 1400 м на северном макросклоне находится в равных условиях по приходу ФАР с поясом 1800 м южного макросклона. Максимальные различия складываются между южными склонами IV района в нижних высотных поясах и северными склонами I и II районов на высоте 1800 м. Аналогом первых по приходу ФАР является горизонтальная поверхность за период с $t_v \geq 10^\circ\text{C}$ в континентальном районе Кустаная на близкой φ или в Прибалтике на $\varphi=58\div 60^\circ$. В первом случае высокие суммы ФАР формируются при преобладании малооблачной погоды и достаточно больших h_{\odot} , во втором — за счет увеличения продолжительности светового дня и доли рассеянной радиации в суммарном потоке. Аналогом минимальных сумм ФАР является горизонтальная поверхность севернее Воркуты [73, 107].

В пределах одного климатического района максимальный приход ФАР отмечается на среднекрутых южных склонах в нижних высотных поясах, минимальный — на северных крутых на $H=1800\div 2000$ м.

По приходу суммарной ФАР северный наветренный склон Западного Саяна на высотах до 800 м близок к условиям также наветренного восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня (табл. 31). Влияние φ проявляется в больших различиях между экспозициями на $\varphi=52,7^\circ$. В результате южные склоны при $\Delta\varphi=8\text{—}9^\circ$ получают равные дозы ФАР, а северные — на 4—5 ккал/см² за период меньше на более высоких φ .

Из этих сопоставлений видно, что экспозиционный фактор в большей степени определяет приход радиации, чем изменение широты. Напомним, что широтный градиент возможных сумм

Суммы суммарной ФАР (ккал/см²) за вегетационный период с $t_v \geq 10^\circ\text{C}$ для Западного Саяна [143] и Приморского края (Средний Сихотэ-Алинь, восточный макросклон)

A_c	Группы районов Западного Саяна						Приморский край, 300—800 м
	I и II			IV			
	600 м	1400 м	1800 м	600 м	1400 м	1800 м	
Горизонтальная поверхность	22,7	12,0	6,2	26,5	17,8	12,1	24,5
Склоны крутизной 10°							
С	20,9	11,0	5,7	26,2	16,5	11,2	23,4
СВ	21,3	11,2	5,8	26,8	16,8	11,4	23,7 (23,9)
В	22,4	12,1	6,1	28,2	17,6	11,9	23,7 (24,3)
ЮВ	23,5	12,2	6,3	29,6	18,2	12,4	24,7 (24,8)
Ю	23,9	12,5	6,5	30,2	18,6	12,6	25,0
Склоны крутизной 20°							
С	18,5	9,9	5,1	23,0	14,7	10,1	22,2
СВ	19,4	10,3	5,4	24,3	16,3	10,5	22,3 (22,5)
В	21,6	11,3	5,9	27,3	16,9	11,5	23,3 (23,6)
ЮВ	23,6	12,3	6,3	30,0	18,4	12,4	24,4 (24,6)
Ю	24,4	12,6	6,6	31,0	18,9	12,7	24,8
Склоны крутизной 30°							
С	15,7	8,4	4,4	19,3	12,5	8,7	19,9
СВ	17,1	9,0	4,7	21,1	13,5	9,3	20,5 (20,7)
В	20,5	10,8	5,6	25,9	16,1	10,9	21,9 (22,3)
ЮВ	23,3	12,0	6,2	29,7	18,0	12,2	23,4 (23,8)
Ю	24,3	12,4	6,4	31,0	18,7	12,5	24,2
Склоны крутизной 40°							
С	12,4	6,8	3,5	15,0	10,0	7,0	17,3
СВ	14,6	7,7	4,0	18,0	11,5	7,9	18,2 (18,4)
В	19,3	10,1	5,2	24,3	15,1	10,3	20,1 (20,5)
ЮВ	22,4	11,6	6,0	28,6	17,4	11,7	22,2 (22,5)
Ю	23,5	12,0	6,3	30,1	18,0	12,0	23,0

Примечание. В скобках даны суммы ФАР для склонов с западной составляющей.

ФАР на горизонтальную поверхность между 44 и 52° с. ш. не превышает 2—3 ккал/см² за теплый период [73, 74, 107].

Обратные соотношения выявляются при сравнении Сихотэ-Алиня и южного макросклона Западного Саяна: здесь отмечается сходство в режиме ФАР северных склонов и увеличение различий в режиме ФАР южных склонов. В этом случае определяющим фактором является облачность, региональные различия режима которой способствуют сглаживанию экспозиционных градиентов и обуславливают смену знака широтного градиента.

В двух сравниваемых регионах при действительных условиях облачности наблюдается нарушение равенства возможных сумм радиации между восточными и западными склонами. Причем в Приморском крае дневной ход облачности способствует некоторому увеличению сумм радиации на склонах, развернутых к западу. В Западном Саяне результатом увеличения облачности во вторую половину дня (см. рис. 12) является возрастание сумм радиации на склонах восточной экспозиции.

Приведенные в этом параграфе материалы позволяют сделать вывод, что основной региональной чертой радиационного режима Западного Саяна является наличие резко контрастных условий между северным и южным макросклонами. Эти различия связаны преимущественно с режимом облачности и в меньшей степени с прозрачностью атмосферы. Макроэкспозиционные контрасты сравнимы (а в ряде случаев и перекрываются) с мезомасштабными различиями. Причем мезоэкспозиционные градиенты возрастают по мере увеличения крутизны склона. Последнее более ярко проявляется в сухих континентальных условиях южного макросклона. Совокупное воздействие широты, высоты над уровнем моря, облачного режима, экспозиции и крутизны склонов порождает значительные пространственные градиенты радиации.

1.6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные для горных районов Юго-Западного Тянь-Шаня свидетельствуют о преобладающей роли экспозиции в распределении ΣQ_d за теплый период и практически об отсутствии (для ряда экспозиций) высотной поясности (рис. 20). При этом принципиальные различия отмечаются в приходе радиации к поверхности северных и южных склонов. Для первых суммарные энергоресурсы (независимо от высоты над уровнем моря) сравнимы с таковыми для горизонтальной поверхности в широтной зоне 64—65° (Архангельск—Каунас), для вторых — с ΣQ_d за теплый период на ϕ около 39—38° (Душанбе, Ак-Молла и т. п.).

В горных условиях Западного Саяна высотная поясность выражена более отчетливо (рис. 21). Это прежде всего связано с тем, что в конкретном примере ΣQ_d ФАР рассчитывались с уче-

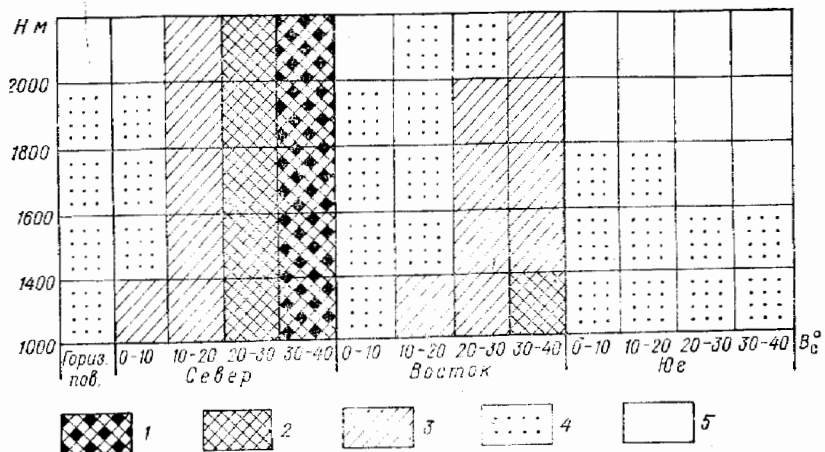


Рис. 20. Схема изменения средних многолетних сумм суммарной ИНТ радиации за май—сентябрь в среднегорной зоне Юго-Западного Тянь-Шаня.

ΣQ_d^* ккал/(см² · т. п.): 1) 50—60, 2) 60—70, 3) 70—80, 4) 80—90, 5) >90.

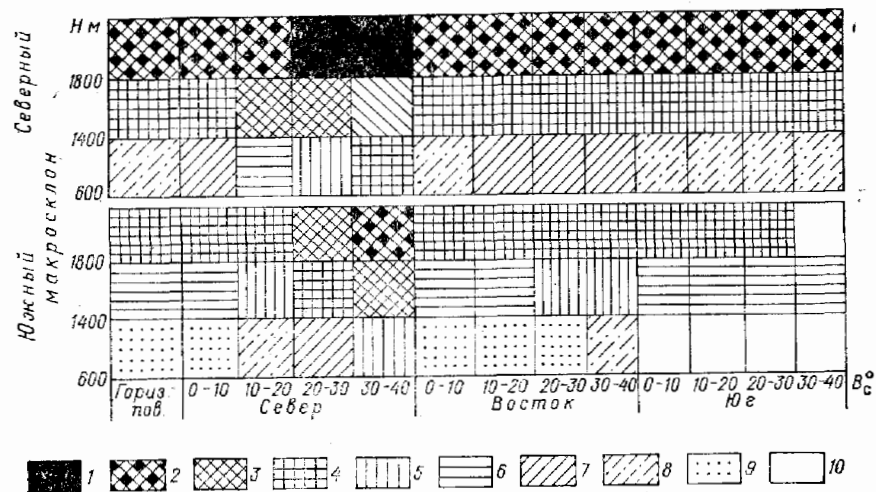


Рис. 21. Схема изменения средних многолетних сумм суммарной ФАР за вегетационный период в горных условиях Западного Саяна.

Q_d^* ккал/(см² · вег. период): 1) <5, 2) 5—7, 3) 7—10 (ЕТС. 72—69°), 4) 10—13 (ЕТС. 67°; АТС (ДВ), 55°); 5) 13—16 (АТС. 68°), 6) 16—19 (ЕТС. 65°; АТС. 67°); 7) 19—22 (ЕТС. 60°; АТС. 53°); 8) 22—25 (ЕТС. 57—55°; АТС. 52—51°); 9) 25—28 (ЕТС. 54°; АТС. 51—49°), 10) 28—31 (ЕТС. 53—52°, АТС. 48°). В скобках даны широты для ЕТС или АТС, где наблюдаются также же значения ΣQ_d .

том изменения продолжительности вегетационного периода с высотой. Но и при такой форме представления данных очевидно наличие различных условий в пределах одного высотного пояса, сравнимых с суммарным приходом ФАР на горизонтальную поверхность в разных физико-географических районах.

Характер вертикального изменения суммарной радиации в двух сравниваемых регионах принципиально различен. В условиях более континентального климата и преобладания ясной погоды в течение теплого периода в Юго-Западном Тянь-Шане наблюдается возрастание $\sum Q_d$ и $\sum Q_d^*$ по мере увеличения высоты. В Западном Саяне отмечается обратная тенденция, обусловленная спецификой вертикального профиля облачности. Усиление экспозиционного фактора в Юго-Западном Тянь-Шане не противоречит общей тенденции увеличения роли этого фактора в определении величин K_s и K_Q в более высоких широтах. В значительной степени это может быть следствием контрастов в инсолируемости склонов, обращенных к Солнцу и ориентированных от него в противоположную сторону, возрастающих при больших h_0 . Наличие в пределах одного высотного пояса различий, соизмеримых с приходом радиации в разных физико-географических районах (удаленных на сотни и тысячи километров), определяет необходимость использования статистических характеристик пространственной изменчивости элементов климата при выделении высотных поясов. Несомненно, что изменение одного из элементов климата (в том числе и радиационных характеристик) не исчерпывает представление об изменении климата с высотой, так как высотная поясность обусловлена тепло- и влажорезимом в целом.

Для характеристики влияния высоты, экспозиции и крутизны приведем некоторые оценки.

Если за критерий возможных масштабов изменения радиационных характеристик в горных условиях принять величину межширотного градиента сумм радиации за период май—сентябрь (на 1°) в диапазоне $\varphi=41 \div 53$, то оказывается, что при безоблачном небе:

а) вертикальные градиенты $\sum S_0$ (на 100 м) в середине лета соизмеримы с межширотными градиентами в зоне $\Delta\varphi=1,5 \div 4^\circ$;

б) вертикальные градиенты $\sum Q_0$ (на 100 м) в середине лета соизмеримы с межширотными градиентами в зоне $1,8-2,5^\circ$ (на $\varphi 41$ и 53°);

в) различия между $\sum S_0^*$ и $\sum Q_0^*$ пологих и крутых склонов одной экспозиции соизмеримы с межширотными $\Delta\sum S_0$ и $\Delta\sum Q_0$ для зон $\Delta\varphi=6 \div 23^\circ$ (южные склоны) и превышают значения градиентов на территории страны (северные склоны);

г) экстремальные межэкспозиционные различия в пределах одного высотного пояса во много раз превышают значения градиентов по территории страны.

При средних многолетних условиях облачности в различных климатических областях умеренного пояса сохраняются общие тенденции в приходе радиации к склонам, характерные для безоблачного неба. Однако облачность нивелирует пространственные контрасты. Общий уровень ослабления возможных сумм радиации, а также степень сглаживания пространственных контрастов обусловлены региональными особенностями режима облачности.

Масштаб воздействия высоты, экспозиции и крутизны склона очевиден из следующих соотношений:

а) вертикальные градиенты $\sum S_d^*$ и $\sum Q_d$ (на 100 м) соизмеримы с межширотными градиентами $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ в зоне $\Delta\varphi < 1^\circ$;

б) различия в $\sum S_d^*$ и $\sum Q_d^*$ пологих и крутых склонов одной экспозиции соизмеримы с межширотными различиями $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ для зон $\Delta\varphi=2 \div 20^\circ$;

в) экстремальные межэкспозиционные контрасты в пределах одного высотного пояса для $\sum S_d^*$ соизмеримы с межширотными $\Delta\sum S_d$ в зоне $\Delta\varphi=15 \div 20^\circ$, для $\sum Q_d^*$ — с $\Delta\sum Q_d$ в зоне $\Delta\varphi=20 \div 32^\circ$;

г) в районе Среднего Сихотэ-Алиня экстремальные пространственные различия много меньше, чем в Юго-Западном Тянь-Шане (при близких соотношениях для возможных сумм): по абсолютной величине они соизмеримы с межширотными $\Delta\sum S_d$ и $\Delta\sum Q_d$ в зоне $\Delta\varphi=8 \div 13^\circ$;

д) на всех широтах для северных склонов в большей степени характерна азональность: $\sum S_d^*$ и $\sum Q_d^*$ на их поверхности соответствуют $\sum S_d$ и $\sum Q_d$ на широтах, удаленных на $11-25^\circ$ от средней широты региона. Южные склоны получают радиации столько, сколько горизонтальная поверхность, расположенная на $2-6^\circ$ к югу от средней широты региона.

Эти оценки характеризуют возможные масштабы трансформации солнечной радиации в среднем за теплый период в геосистемах различных региональных и типологических рангов. Они свидетельствуют также в пользу преобладающей роли экспозиционного фактора и крутизны склона по сравнению с воздействием высоты. Роль первых двух факторов усиливается по мере увеличения континентальности климата, а также в переходный и зимний периоды года (последнее было показано на примере Среднего Сихотэ-Алиня).

В целом суммарный эффект экспозиции и крутизны в процессе трансформации солнечной радиации в геосистемах различного масштаба иллюстрируют следующие данные¹:

Геосистемы (ландшафтные категории)	$\Sigma s_d^*/\Sigma s_d'$	$c_v \Sigma s_d^*$
Подурочище	0,86	0,06
Простое урочище	0,87	0,09
Сложное урочище	0,80	0,16
Два сложных урочища	0,84	0,13
Район	0,93	0,10
Два района	0,94	0,07

В одном типе геосистемы воздействие экспозиции и крутизны усиливается в холодный период года. Это положение иллюстрируется на примере горной долины, являющейся комбинацией двух сложных урочищ:

	$\Sigma s_d^*/\Sigma s_d'$	$\Sigma q_d^*/\Sigma q_d'$	$c_v \Sigma s_d^* / \Sigma q_d^*$
Лето			
прямая радиация	0,84		0,13
суммарная радиация		0,84	0,18
Зима			
прямая радиация	1,06		0,67
суммарная радиация		1,03	0,55

Можно полагать, что по мере увеличения континентальности климата коэффициент вариации C_v в пределах одной геосистемы должен возрастать. При этом относительный приход радиации в геосистеме на единицу площади по сравнению с приходом радиации на единицу площади, равно по размерам горизонтальной поверхности, будет определяться долей различно ориентированных поверхностей в самой геосистеме. Очевидно также, что независимо от общих климатических условий по мере увеличения ранга геосистемы приход радиации на единицу площади будет приближаться к таковому для горизонтальной поверхности. Иными словами, чем сложнее структура геосистемы, тем в большей степени трансформация солнечной радиации за счет суммарного воздействия рельефа соответствует случайному типу преобразования входных сигналов в системе.

¹ Получены на основе обработки крупномасштабных карт прихода радиации для условий Среднего Сихотэ-Алиня.

* * *

Так как приход радиации в условиях горных геосистем определяет потенциальные ресурсы РП, можно констатировать, что горные РП продуцируют в более контрастных условиях прихода радиации, чем равнинные. При этом в пределах одной геосистемы (например, горные долины одного порядка) межэкспозиционные различия во много раз перекрывают вертикальные и межширотные градиенты. Причем пространственные различия в приходе радиации к верхней границе горных РП, произрастающих на разных склонах в пределах одной горной долины, могут быть соизмеримы не только с межширотными градиентами для территорий, удаленных на 3000 км, но и с внутриширотными различиями в приходе радиации на горизонтальную поверхность между западными и восточными районами страны, относящимися к принципиально различным климатическим областям. В то же время региональные условия режима облачности обуславливают сходство в приходе радиации к верхней границе РП между горными странами, удаленными по широте на 10° (например, Сихотэ-Алинь и Западный Саян). Рассмотренные выше контрасты способствуют формированию ландшафтной асимметрии склонов и соответственно большей мозаичности в распространении растительности.

Следует также подчеркнуть, что сходство в суммарных энергоресурсах различных местообитаний не означает полной тождественности их радиационного режима. Различия в интенсивности прямой и рассеянной радиации, в их соотношении в общем суммарном потоке, в продолжительности светового дня и т. п. определяют разнообразие радиационных условий в пределах различных геосистем и характер использования солнечной радиации РП. Кроме того, за рамки настоящей работы выходит рассмотрение изменения спектрального состава радиации в горных геосистемах (особенно в высокогорье), которое имеет немаловажное значение для развития растений [17, 174, 175 и др.].

II.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Неравномерное распределение солнечной радиации, поступающей к верхней границе РП, обусловленное влиянием астрономических факторов, режимом облачности, прозрачностью атмосферы, а также рельефом, определяет разнообразие потенциальных энергетических ресурсов физиологических, физических и других процессов в РП. Дальнейшая трансформация потоков радиации в растительном сообществе при фиксированных условиях прихода радиации обусловлена оптическими свойствами полога РП. Эти свойства определяются как оптическими характеристиками отдельных фитоэлементов [10, 174, 175, 210], так и структурой РП. В лесных фитоценозах при большом разнообразии видового состава, а также комбинаций световых и теневых листьев (хвои) роль оптических свойств отдельных фитоэлементов нивелируется. Значимые различия в спектральном составе восходящих и нисходящих потоков радиации выявляются только при сравнении групп хвойных и лиственных лесов [8, 10, 163, 274, 276, 277 и др.].

В экспериментальной фитоактинометрии РП долгое время рассматривался как «черный ящик». Характеристики его радиационного режима давались на основе сравнения радиации на верхней границе РП и под пологом (или отраженный от полога). Свойства самого РП описывались преимущественно качественно (например, через указание видового состава, возраста и т. п.). Некоторыми исследователями делались попытки установить эмпирические зависимости между величинами радиации (или освещенности) под пологом и количественными характеристиками древостоя. Так, в работах Л. А. Иванова [83] и других авторов (например, Руссел [273]) в качестве такой характеристики рассматривалась густота насаждения. В ряде работ использовались характеристики абсолютной и относительной

полноты (сумма площадей сечения стволов на высоте 1,3 м), сомкнутости полога крон и т. п.¹

Японские ученые Монси и Сазки впервые количественно описали зависимость между пропусканием радиации и площадью листьев [240]. В их работе РП рассматривался как мутная однородная среда, в которой ослабление радиации происходит по закону Бугера—Ламберта—Бэра:

$$I = I_0 e^{-kL}, \quad (24)$$

где L — индекс листовой поверхности ($\text{м}^2/\text{м}^2$), I — интенсивность радиации в РП ниже слоя с определенным L , I_0 — интенсивность радиации на верхней границе РП, k — коэффициент экстинкции и e — основание натуральных логарифмов.

Однако структура природных РП значительно отличается от теоретических представлений. Эти отклонения очевидны из изменений коэффициента экстинкции (примерно от 0,3 до 2,5) как по вертикальному, так и горизонтальному профилю в РП [2, 59, 133, 165 и др.]. При $h_0 = \text{const}$ варибельность значений k связана с изменением угла наклона фитоэлементов (листьев, стеблей, веток и т. п.) и типом их пространственного размещения. В совокупности перечисленные характеристики структуры определяют площадь просветов между фитоэлементами, их взаимное затенение и особенности распределения просветов в пологе.

Влияние пространственной ориентации фитоэлементов (по углу наклона и азимуту) на пропускание прямой радиации было учтено в ряде дальнейших теоретических работ [112, 114, 115, 179, 192, 212, 273, 296, 297]. С этой целью в степень экспоненты было предложено ввести дополнительный множитель — G -функцию, которая определяет проекцию единичной площади фитоэлементов, находящейся в единице объема РП на некоторой высоте z , на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам. Иногда вместо G -функции используют средний угол наклона листьев от горизонтали [192, 212, 280 и др.]. В этих моделях структура системы РП рассматривается уже как горизонтально однородная среда, сформированная случайно расположенными фитоэлементами с заданным вертикальным распределением их площади и пространственной ориентацией.

Влияние типа размещения фитоэлементов (эффект упаковки) экспериментально впервые было доказано Е. В. Абашиной на примере посевов ячменя [1, 2]. Теоретически этот фактор (определяющий прежде всего площадь взаимных перекрытий и взаимного затенения) для прямой радиации был учтен в работах Ю. К. Росса, Т. А. Нильсона и др. [114, 115, 136, 137, 234—236, 251, 284, 290]. В исследованиях Нормана, Миллера и Таннера

¹ Более полное представление о путях развития экспериментальной лесной фитоактинометрии можно получить из монографии В. А. Алексева [10].

[238, 252—254] рассматривалось влияние случайного и неслучайного типа размещения на статистику распределения солнечных бликов и эффект полутени в РП.

На современном этапе теория радиационного режима РП с пространственно-неоднородной структурой развивается в направлении совершенствования геометрических моделей [193, 194, 221, 233, 236] и статистической теории переноса радиации [114, 115, 233, 251, 256]. В последние годы появились исследования, в которых для моделирования структуры РП и радиационного режима используется метод Монте-Карло [237, 255—257, 285].

Следует подчеркнуть, что применительно к лесным фитоценозам использование различных теоретических и полуэмпирических формул, в которых РП рассматривается как однородная среда с заданным по тому или иному статистическому закону расположением фитоэлементов с определенной площадью и с учетом их пространственной ориентации, весьма ограничено. Это обусловлено прежде всего тем, что основной параметр структуры системы РП — вертикальный профиль площади фитоэлементов и L — на практике определяется по данным обработки нескольких модельных деревьев. Распространение таких единичных данных на весь ценоз влечет за собой значительные погрешности [10, 226]. Эти погрешности усугубляются также за счет пространственной неоднородности структуры, особенно типичной для лесных ценозов. Кроме того, трудоемкость определения пространственной ориентации фитоэлементов в различных слоях полога затрудняет нахождение G -функции.

Поскольку основной энергетический вклад в поток радиации в толще РП вносят прямая солнечная радиация и рассеянная радиация неба, поступающая в РП через просветы [137], то наиболее приемлемым путем изучения радиационного режима лесных сообществ является нахождение связей между пропусканием радиации и ажурностью (сквозистостью) полога. Такой подход был предложен Эвансом и Кумбом в 1959 г. [204] и в дальнейшем развит в работах Андерсон [180, 181] и Т. А. Нильсона [113, 251]. Эмпирические связи между ажурностью и пропусканием радиации использовали в своих работах В. А. Алексеев, Н. Н. Выгодская, Н. В. Зукерт, Ю. Л. Цельникер, Бекер, Браун, Дукрей, Шартье, Хорн и др. [10, 46—48, 79, 163, 185, 195, 199, 221]. Теоретическое моделирование прозрачности полога деревьев, пространственного размещения деревьев и формы кроны, а также некоторые экспериментальные исследования были проведены Т. А. Нильсоном и Ю. К. Россом [114, 115, 136].

Учитывая основные положения теории переноса радиации в пространственно-неоднородном РП и результаты экспериментальных работ, в наших исследованиях при описании структуры РП мы исходили из следующих соображений. При фиксирован-

ных условиях прихода радиации на верхнюю границу РП ее дальнейшая трансформация в системе РП происходит неодинаково на участках с различной плотностью. При одном видовом составе внутри РП¹ можно выделить: 1) области, занятые кроной одного дерева, 2) области, занятые кронами нескольких деревьев, и 3) области, не занятые кронами.

В первом случае пропускание радиации будет определяться внутрикроновой ажурностью, во втором — ажурностью в области перекрытий крон и в третьем — размерами и размещением межкроновых просветов. Внутрикроновая ажурность является видовой и экологической характеристикой, зависящей также от возраста особи [163]. Особенности строения второй и третьей из выделенных областей преимущественно связаны с типом пространственного размещения особей и их габитусом. В то же время возможность пересечения крон определяется светолюбием вида и соответственно его требованием к жизненному пространству. Следует отметить, что при определенных размерах особи тип пространственного размещения обуславливает также их взаимное затенение.

Таким образом, в дальнейшем структура системы РП будет описываться через размеры и характер размещения просветов в пологе. Массовый материал об этих характеристиках структуры был получен нами на основе обработки более 1000 полусферических фотографий, сделанных объективами "Fish-eye" с углом зрения 180 и 130°. Так как фотографирование полога проводилось примерно на высоте 1,3—1,5 м над поверхностью земли, то полученный материал не позволяет анализировать вертикальные профили пропускания радиации и характеризует только особенности пропускания пологом верхних ярусов в зависимости от их структуры.

Если итогом комбинации типа пространственного размещения, внутрикроновой структуры и т. д. является случайный характер расположения просветов в пологе верхних ярусов РП, то в РП происходит случайное преобразование радиации (например, под пологом верхних ярусов можно ожидать на фоне общего ослабления радиации сохранение тех закономерностей суточного хода радиации, который характерен для уровня верхней границы РП). При этом ослабление радиации в РП должно происходить по экспоненциальному закону, что вообще характерно для ослабления нисходящих потоков радиации в слое растительности, в котором фитоэлементы расположены случайно по закону Пуассона, как это имеет место и в самом листе.

Если наблюдается некоторая упорядоченность в расположении фитоэлементов (или просветов), то могут возникнуть

¹ При сложном видовом составе принципиальный подход к выделению перечисленных областей сохраняется, увеличивается только число возможных комбинаций.

определенные отклонения от чисто экспоненциального закона, характерные для регулярного или группового размещения фитоэлементов (просветов) [114, 136, 137, 233, 252—254 и др.].

Так как закономерности размещения просветов в пологе леса (а тем более горных лесов) изучены весьма слабо, то приводимые ниже данные по горным лесам рассматриваются в сравнении с данными для равнинных лесов. Это сравнение позволяет выявить наличие (или отсутствие) специфики в строении древесного яруса горных лесов.

Следует подчеркнуть, что вопрос формирования различного типа структур природных РП является сам по себе чрезвычайно интересным, ибо его изучение позволяет подойти к решению важной и сложнейшей экологической проблемы — проблемы саморегуляции, организации и функционирования растительных сообществ. Однако из-за ограниченного объема книги вопросы структуры в экологическом аспекте не рассматриваются.

II.2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ

На первом этапе описания структуры лесных ценозов можно в качестве элементарного фитоэлемента рассматривать отдельное растение, не учитывая особенностей его собственной структуры. При таком подходе анализ закономерностей размещения растений в пространстве дает представление об общем типе горизонтальной структуры РП и позволяет оценить, насколько упорядоченно или случайно размещены особи в пространстве фитоценоза. Общий тип структуры в зависимости от видового состава и размера особей определяет плотность заполнения кронового пространства, возможный характер пересечения крон и их взаимное затенение. С позиций теории переноса радиации в РП информация о закономерностях размещения растений в лесных ценозах представляет интерес для оценки применимости моделей радиационного режима, построенных при допущении случайного распределения фитоэлементов по закону Пуассона [например, 114, 137, 233].

II.2.1. Некоторые методические вопросы изучения типа пространственного размещения

В количественной экологии и геоботанике принято выделять три типа размещения, основанных на характере изменчивости признака: регулярное, случайное и групповое (контагиозное или агрегационное).¹ При случайном типе² особи в пространстве

¹ Т. Фрей [160] выделяет пять типов, дополнительно вводя оценку плотности фитоценоза.

² В отдельных работах синонимом «случайного» типа является равномерное распределение [31, 84 и др.], в [67 и др.] под равномерным понимается регулярный тип распределения.

располагаются относительно беспорядочно, т. е. независимо друг от друга. Вероятность обнаружения особи в какой-либо точке пространства одинакова для всех точек и не меняется от наличия других особей в соседней точке. Регулярный и групповой типы размещений характеризуют различные отклонения от случайного типа. Регулярный тип соответствует наиболее упорядоченной структуре сообщества, когда особи располагаются в определенной последовательности относительно друг друга и присутствие одного индивидуума уменьшает вероятность нахождения рядом другого [67]. Для структур подобного рода характерно минимальное варьирование численности по площади. Напротив, групповое размещение характеризуется максимальной изменчивостью численности растений в пространстве. При этом типе размещения увеличивается число «пустых» участков (или с малым количеством особей) и участков с повышенной плотностью.

Интерес к типизации рисунка размещения и выявлению отклонений от случайного распределения первоначально возник в связи с решением задач определения численности видов в сообществе [31, 67, 160, 188, 198, 218, 220, 237, 244, 245, 262, 263]. Дальнейшее развитие исследований горизонтальной структуры связано с изучением взаимоотношений как между растениями, так и между растениями и факторами среды [67, 84, 126, 187, 196, 198, 261, 262, 264] и с решением ряда практических задач лесного хозяйства [84, 85 и др.].

Оригинальная трактовка характера размещения дана В. В. Плотниковым [123]. Он подошел к анализу горизонтальной и вертикальной структур с эволюционной точки зрения, полагая, что тип размещения претерпел определенные изменения в ходе эволюции автотрофных организмов. Рассматривая групповое размещение как соответствующее началу эволюционного процесса, Плотников располагает отдельные роды древесной растительности в ряд их филогенетической «разновозрастности». Так, для сообществ голосеменных растений намечается следующая последовательность по увеличению упорядоченности структуры: ель—сосна—пихта—лиственница; аналогично в сообществах покрытосеменных древесных растений: дуб—бук—осина—липа—береза. Причем чем моложе в филогенетическом плане род, тем больше отклонения в сторону регулярности, т. е. тип размещения предопределен филогенетическим возрастом растений.

По мнению большинства исследователей, занимавшихся изучением горизонтальной структуры, случайный тип размещения в природе встречается не очень часто, наиболее распространенным типом является групповой [31, 67, 84, 126, 196, 198, 264 и др.]. Преобладание последнего в природных РП объясняется преимущественно неоднородностью среды обитания и причинами ценотического характера (в том числе условиями размножения

растений и процессом самоизреживания). Регулярный тип рассматривается как вообще не характерный для естественных сообществ.

Несколько противоречит сложившемуся мнению заключение Бланкмайстера [188] о распространенности древостоев со случайным типом размещения, а также данные, приводимые Плотниковым. Однако последние нельзя составлять с оценками типов других авторов, ибо введенная модификация метода пробного круга (при подсчете численности только в окружностях, центром которых являются последовательно все особи [123]) не позволяет выявить характер размещения деревьев по всей площади фитоценоза. Так, например, для одной из пробных площадей в березняке (пр. пл. 7 табл. 32) были получены следующие распределения численности при разных способах наложения пробного круга:

x_i (число деревьев)	0	1	2	3	4	
P_1	0,600	0,360	0,200	0,400	—	$\bar{x}_1 = 0,88$
P_2	—	0,487	0,387	0,136	—	$\bar{x}_2 = 1,60$
P_3	0,407	0,366	0,165	0,049	0,049	$\bar{x}_3 = 0,90$

(P_1 — относительная численность при наложении круга в случайных точках, P_2 — в точках, соответствующих положению стволов, P_3 — теоретическое распределение по закону Пуассона).

Между распределениями 1 и 2 различия достоверны при 1 %-ном уровне значимости. Относительная дисперсия σ^2/\bar{x} для обоих распределений недостоверно отличается от единицы, т. е. на основе этого критерия оба эмпирических распределения соответствуют случайному типу. Однако при подчинении закону Пуассона в распределении 1 снизилась бы частота нулевого класса, и именно за счет этих различий оценка по χ^2 показывает неслучайный характер размещения. Так как выявленные отклонения формируются за счет крайних классов, распределение 1 можно классифицировать как соответствующее контактичному типу [31, 67]. Этот вывод не согласуется с конечной оценкой типа размещения по методу наложения пробного круга без учета незанятых растительностью участков.

Сам по себе метод Плотникова может служить полезным инструментом для определения требований вида к плотности заполнения фитоэлементами окружающего пространства. Так как конкурентные возможности вида при определенных условиях среды являются ограниченными, естественно, что и варьирование численности особей в пределах области жизненного пространства одной особи также будет ограничено. Этим объясняется полученный Плотниковым вывод о распространенности

регулярного типа размещения (во всяком случае о тенденции к этому типу) в современных лесных сообществах.

Противоположный вывод о распространенности группового типа получен В. С. Ипатовым [84] на основе анализа кривых распределений наименьших расстояний между деревьями. При этом расстояния, в отличие от принятых методов в количественной экологии и геоботанике, измерялись не между случайными особями или случайной точкой и ближайшей особью [67, 198, 218, 220, 261], а как наименьшие между соседями по фиксированному направлению в секторе 180° с учетом практически всех деревьев на пробной площади.

Для проверки сопоставимости результатов, полученных с помощью метода Ипатова, была проведена оценка типов размещения на модельных распределениях, заимствованных из работы Морисита [245]. Как видно из рис. 22, для модели *a* (случайный тип размещения) кривая распределения имеет несколько достоверных деформаций, выявленных методом «отношения частот» [84]. Отсюда, согласно Ипатову, тип размещения может трактоваться как групповой, а выявленные деформации — как отражающие внутрigrупповые и междrупповые расстояния. Для модели *b* (с регулярным размещением точек) на кривой распределения также выявлена одна достоверная деформация, т. е. и в этом случае можно говорить о скоплении точек, удаленных друг от друга на определенные расстояния. При этом кривая фактического распределения для модели *a* недостоверно отличается от нормального закона, для модели *b* — соответствует 1-му типу кривых Пирсона. Однако во втором варианте при более мелких классах кривая также соответствует нормальному закону. Это свидетельствует о том, что оценки на основе метода Ипатова существенно зависят от детализации представления фактических данных.

Кроме того, наличие деформации на кривых, полученных для заведомо случайной и регулярной структур, указывает на то, что метод не обеспечивает случайную выборку непосредственно наименьших расстояний. Это практически систематическая выборка расстояний между двумя точками в заданном направлении, причем для каждой из этих точек возможен вариант более близкого соседа в противоположном направлении. Соответственно выборка компонуется из любых расстояний за исключением максимальных.

Таким образом, метод Ипатова, в противоположность методу Плотникова, завышает вероятность обнаружения группового типа размещения. Именно предпосылки, заложенные в каждом из двух методов, приводят к противоречивым результатам, полученным этими авторами. Вывод Ипатова о преобладании групповых структур в природных лесных сообществах близок к истине, так как в каждом сообществе естественно существуют более или менее ясно выраженные группы.

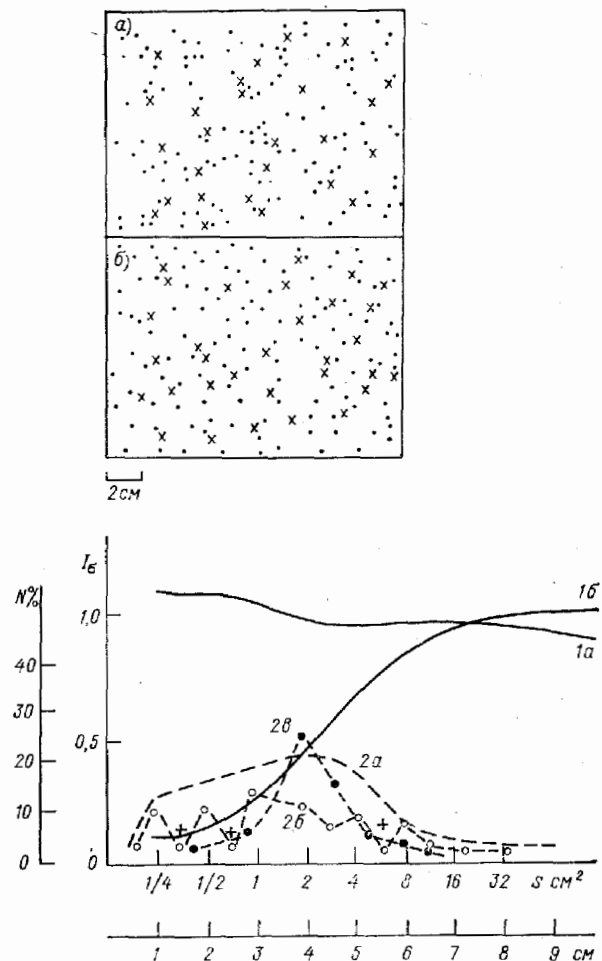


Рис. 22. Модели размещения и соответствующие им схемы изменения I_g .

a — случайное распределение ($1a$), b — регулярное ($1б$) [245]; крестиком (\times) обозначены случайные точки, использованные для оценки типа размещения методом Хопкинса; на графике показаны распределения наименьших расстояний между точками, полученные методом В. С. Ипатова: $2a$ соответствует модели случайного распределения, $2б$, $2в$ — модели регулярного распределения при различных вариантах объединения по классам; знаком плюс (+) показаны точки, где наблюдается достоверная деформация кривых распределения.

Рассмотренный метод отвечает конкретным задачам изучения дифференциации древостоев и способу выявления последствий дифференциации на рисунок размещения деревьев. В этом плане результаты, полученные Ипатовым на большом фактическом материале, представляют несомненный интерес и являются важными для понимания структурно-функциональных особенностей лесных сообществ. Однако проведенные определения для моделей показывают, что этот метод следует осторожно применять в целях унифицированной оценки типов размещения.

Непосредственно в наших исследованиях для оценки типа размещения деревьев на основе планов проекций крон использовались критерии, которые обычно применяются в количественной экологии [31, 67, 220, 244, 245]: относительная дисперсия, индекс Морисита и коэффициент агрегации Хопкинса. Дополнительно на некоторых пробных площадях проводились оценки типа на основе эмпирических распределений наименьших расстояний (точка—растение, растение—растение) [67, 202, 218, 246, 264].

Относительная дисперсия. Этот критерий характеризует отклонение от пуассоновского распределения, которое проявляется при заданном размере учетных площадок. Известно, что признаком пуассоновского распределения является равенство средней и дисперсии, т. е. отношение $\sigma^2/\bar{x} = 1$. Если растения размещены по площади (при значительной изменчивости плотности) группами, то $\sigma^2/\bar{x} > 1$, при регулярном типе $\sigma^2/\bar{x} < 1$. Для оценки значимости отклонения σ^2/\bar{x} от 1 используется критерий Блэкмана [67]. Этот критерий представляет собой стандартное отклонение разности между σ^2/\bar{x} и 1. Он равен

$$s = \sqrt{\frac{2N}{(N-1)^2}}, \quad (25)$$

где N — число образцов (площадок). При большом числе N величина s определяется как

$$s = \sqrt{\frac{2}{(N-1)}}. \quad (26)$$

Далее рассчитывается критерий Стьюдента t_{ϕ} :

$$t_{\phi} = \left(\frac{\sigma^2}{\bar{x}} - 1\right) / \sqrt{\frac{2}{(N-1)}}, \quad (27)$$

величина которого сравнивается с t_{st} при заданной вероятности и $(N-1)$ числе степеней свободы. При $N = 100$ и 5%-ном доверительном уровне регулярному типу размещения соответствуют величины $\sigma^2/\bar{x} < 0,716$, случайному — 0,716—1,284 и групповому — $> 1,284$ [264].

В работах [31, 67, 261, 262) подробно рассматриваются численные примеры, показывающие чувствительность критериев σ^2/\bar{x} и χ^2 для различных типов распределений. Так, метод относительной дисперсии является более чувствительным при отклонениях от пуассоновского распределения, которые формируются при завышенном числе «пустых» площадок или площадок с высокой численностью особей. Критерий χ^2 (за счет группировки крайних классов распределений с низкой частотой) позволяет выявить отклонения от случайного распределения при наличии различий между ожидаемыми и фактическими частотами в средних классах распределений.

Метод Морисита. Этот метод оценки отклонения от случайного распределения основан на показателе разнообразия Симпсона [244, 245]. Последний определяется как

$$\sigma = \frac{\sum n_i (n_i - 1)}{N(N-1)}, \quad (28)$$

где n_i — число особей в i -й группе (площадке), N — общее число растений во всех группах. При числе групп, равном q , величина

$$I_\sigma = q\sigma \quad (29)$$

рассматривается Морисита как мера дисперсии (индекс рассеивания). При случайном типе размещения независимо от размера учетных площадок $I_\sigma = 1$. Для регулярных распределений $I_\sigma < 1$ и для групповых меняется от 1 до q . Причем $I_\sigma = q$ в случае, когда все особи сконцентрированы на одной площадке (максимальная агрегация). Индекс I_σ связан с относительной дисперсией следующим образом:

$$\sigma^2/\bar{x} = (I_\sigma - 1) \bar{x} + 1. \quad (30)$$

Для оценки значимости отклонения эмпирического распределения от случайного определяется величина

$$F_0 = \frac{I_\sigma(N-1) + q - N}{q-1} \quad (31)$$

и далее проводится сравнение отношения дисперсий при числе степеней свободы, равном $(q-1)$ и ∞ , по таблице Фишера для заданного уровня значимости.

Индекс рассеивания I_σ вычисляется для различных размеров площадок (квадратов). Характер изменения I_σ как функции размера площади s определяется размерами скоплений (пятен) особей и распределением особей внутри пятен. Теоретически возможные изменения I_σ в зависимости от s , полученные Морисита при анализе модельных распределений [245], являются тестом для оценки типа размещения. При этом предложенная схема изменения $I_\sigma = f(s)$ позволяет экспертными методами определить как тип размещения пятен, так и распределение

внутри самих пятен (рис. 23). Так, если особи на всей площади (или в отдельных квадратах) размещены регулярно, величина I_σ возрастает по мере увеличения размеров квадрата. При групповом распределении пятен и регулярном размещении внутри пятен величина I_σ возрастает по мере увеличения размеров квадрата, вплоть до определенной величины, которая больше 1 [245].

Помимо экспертных оценок, метод Морисита позволяет количественно определить отклонения от случайного распределения для разнообразных вариантов размещений. Кроме того, на основе соотношения индексов I_σ для площадей с размерами s и $2s$ можно выявить размеры пятен.

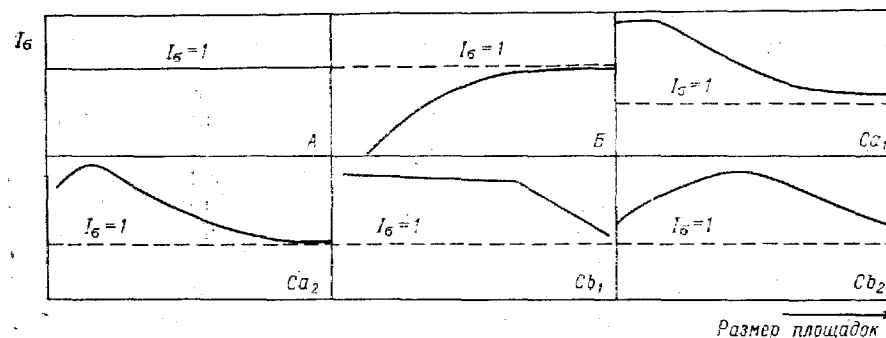


Рис. 23. Зависимость индекса Морисита I_σ от размера площадок при разных типах распределений [245].

A — случайное, B — регулярное, Ca — контактное распределение с мелкими пятнами, Ca_1 — внутри пятен случайное распределение, Ca_2 — внутри пятен регулярное распределение, Cb — контактное распределение с крупными пятнами, Cb_1 — внутри пятен случайное распределение, Cb_2 — внутри пятен регулярное распределение.

Метод Хопкинса. Этот метод основывается на соотношении расстояний от случайно выбранной точки до ближайшего к ней растения X и от случайно выбранного растения до ближайшего его соседа Y . При этом предполагается, что при случайном распределении средние наименьшие расстояния точка—растение и растение—растение равны между собой [220].

Коэффициент агрегации, предложенный Хопкинсом, как показатель характера размещения равен

$$A = \frac{\sum X^2}{\sum Y^2} \quad (32)$$

(при равном числе измерений для X и Y). При случайном распределении $A=1$, при групповом $A>1$ и регулярном $A<1$. Для случайного распределения величина $x=A/(1+A)$ равна 0,5. Оценка значимости отклонения A от 1 проводится с помощью таблиц неполных β -функций при числе испытаний $N \leq 50$. Для малых выборок (20—50) Хопкинс приводит график, с помощью

которого можно выявить неслучайное распределение для $P = 0,95 \div 0,99$ [220]. При $N \geq 50$ рекомендуется использовать таблицы вероятностного интеграла нормального распределения. Подробнее о проверке на значимость величины A можно ознакомиться в работе [220].

Метод Хопкинса менее трудоемок по сравнению с методом Морисита, но характер оценок существенно зависит от соблюдения схемы выбора точек. Используя индекс Морисита в качестве эталона, мы проверили результаты оценки типа размещения по методу Хопкинса на основе двух моделей распределения (см. рис. 22). Для оценки координаты случайных точек определялись по таблице случайных чисел (аналогичная процедура выполнялась и при обработке планов проекций крон). Для модели a (см. рис. 22) $A=0,84$, $x=0,46$, что при $N=20$ соответствует случайному типу размещения. Для модели b (тот же рисунок) $A=0,37$, $x=0,27$, и также при $N=20$ модельное распределение на основе коэффициента агрегации классифицируется как регулярное ($P=0,99$). Таким образом, индексы Морисита и Хопкинса дают одинаковые результаты.

При анализе кривых распределения расстояний точка—растение, растение—растение использовались обычные приемы теории вероятности, позволяющие выявить отклонения эмпирических распределений от теоретических [32, 106, 198]. В качестве критерия неслучайности типа размещения рассматривалась достоверность различий между эмпирическим распределением и нормальным законом. Особое внимание уделялось обеспеченности случайной выборки для точек или особей. С этой целью использовалась таблица случайных чисел, по которой определялись координаты случайной точки для осей x и y в секторе, равном 180° . Для обеспечения случайной выборки особей все деревья нумеровались и далее проводилась процедура повторного случайного отбора, что позволило соблюсти равную вероятность попадания каждого варианта в общую выборку. В ряде случаев измерения проводились полностью для всей совокупности особей.

II.2.2. Тип размещения деревьев в равнинных и горных лесах

В литературе накоплен обширный материал о горизонтальной структуре древостоев равнинных лесов. Опубликованные данные для горных лесов в основном характеризуют сообщества в экстремальных условиях произрастания (на уровне верхней границы распространения лесов или на крутых склонах и т. п. [126 и др.]). Последнее предопределяет очевидный контагиозный тип размещения, обусловленный прежде всего крайне неоднородным распределением факторов среды. В отличие от пространственного подхода, для изучения структуры горных РП

мы выбирали объекты в оптимальных по тепло- и влагорежиму условиях, т. е. заведомо экстремальные ситуации исключались из анализа. Это было сделано с целью сравнения структур древостоев лесов различных местообитаний и выявления общих закономерностей в строении древостоев при условии, когда тепло, влага и режим минерального питания не являются лимитирующими факторами.

Тип размещения деревьев был проанализирован на 36 пробных площадях (табл. 32). Для каждой пробной площади составлялись обычными методами планы проекций крон с нанесением стволов деревьев. Все последующие оценки типа размещения проводились на основе этих планов.

В лиственных лесах пространственное размещение деревьев изучалось на примере дубовых и березовых лесов Приморского края, а также орехово-плодовых лесов Южной Киргизии. Пробные площади 0,3—0,5 га в дубовых лесах были заложены на восточном макросклоне Среднего Сихотэ-Алиня. Этот регион относится к горно-приморскому Ольгинско-Дальнегорскому округу маньчжурской материковой провинции кедрово-широколиственных и дубовых лесов Дальневосточной хвойно-широколиственной области [90]. На побережье Японского моря в условиях низкогорного среднерасчлененного рельефа с пологими склонами преобладают леса из дуба монгольского (*Quercus mongolica*) с участием березы даурской (*Betula daurica*). Здесь дуб формирует достаточно большие однородные массивы. В районах, удаленных от побережья, дубовые леса (возникшие на месте кедрово-широколиственных лесов при экзодинамических сменах) имеют более сложный видовой состав. В древесном ярусе совместно с дубом встречаются различные виды берез, осина и липа, участие которых определяется условиями произрастания [97, 148 и др.].

Березовые леса на территории Приморского края в настоящее время распространены достаточно широко. Они возникают на месте старых гарей и вырубок, представляя собой одну из начальных стадий экзодинамических смен растительности коренных темнохвойных и кедрово-широколиственных лесов [97 и др.]. В зависимости от предшествующего типа коренной растительности, экспозиции и крутизны склона в древостое вторичных лесов доминируют различные виды берез. Содомиантом березы в мелколиственных лесах чаще всего является осина Давида (*Populus davidiana*). К склонам северной экспозиции обычно приурочены леса из березы маньчжурской (белой) (*Betula mandshurica*). Белоберезняки (так же как и осинники), будучи в основном порослевого происхождения, характеризуются простой одноярусной структурой и являются разновозрастными [97]. В отдельных случаях подрост из ели, пихты и кедра может формировать второй ярус.

Характеристика древесного яруса пробных площадей

№ пробной площади	H м, A _c , B _c	Видовой состав	Средний возраст (средняя высота, м)	Сомкнутость
Лиственные леса				
Восточный макросклон Среднего Сихотэ-Алиня				
1	100 3ЮЗ, 15—20	10Д	40 (8)	0,8—0,9
2	100 3ЮЗ, 10	9Д1Б	80	0,7—0,8
3	100 В, 10	10Д	30—35 (7)	0,5—0,7
4	450—500 З, 25—30	10Д	30—40	0,7—0,8
5	400—500 С, 35	10БедОс (н. ч. скл.)	18—23	0,8
6	400—500 С, 22	10БедОс (ср. ч. скл.)	19—21	0,7—0,8
7	400—500 С, 25	10БедОс, (ср. ч. скл.)	19—21	0,7
8	400—500 С, 20	10Б (в. ч. скл.)	19—21	0,6—0,7
Пихтово-еловые и кедровые леса				
Московская область				
9	Плакор	10Е	13 (2)	0,3
10	"	10ЕедБедОс	40 (14)	0,9
11	"	9Е1ОсдБедЛ	85 (22)	0,8—0,7
12	"	9Е1Б	85 (23)	0,7
13	"	8Е1Ос1Б	90 (27)	0,7
14	"	10ЕедБ	93 (27)	0,7
15	"	8Е1Ос1Б	93 (26)	0,6—0,5
Валдай				
16	Плакор	10Е	80—85 (20)	0,5
17	"	10Е	80—85 (20)	0,4

№ пробной площади	H м, A _c , B _c	Видовой состав	Средний возраст (средняя высота, м)	Сомкнутость
-------------------	---	----------------	-------------------------------------	-------------

Восточный склон Среднего Сихотэ-Алиня

18	Плоский водораздел, 800	5Еа3Бж1Пб + КкКлж	85—220 (17—22)	0,9
19	1000—1100, ССВ, 20	5Еа5ПбедБж	120	0,7—0,8
20	550—600, С, 15	6Еа2Пб1Бж + Кк	100—140 (20—25)	0,8—0,9
21	600—650, С, 18	5Еа5ПбедБж	120—160	0,8
22	600—650, С, 20	5Кк2Еа2Л1Бж + Пб	150 (20—25)	0,8—0,9
23	650—700, Ю, 20—25	6Кк2Л1Пб1Бж	140 (22)	0,6—0,7

Северный макросклон Западного Саяна

24	500—800, СЗ, 15—20	8Кс2П	25—30	0,6
25	450—500, С, 5—15	8Кс2П	25—30	0,4

Примечание. В разделе «Лиственные леса»: Д — дуб монгольский, Ос — осина Давида, Б — береза манчжурская. В разделе «Пихтово-еловые и кедровые леса»: Е — ель европейская, Б — береза пушистая, ювислая, Ос — осина, Д — дуб черешчатый, Еа — ель аяская, Пб — пихта белокорая, Кк — кедр корейский, Бж — береза желтая, Клж — клен желтый, Кс — кедр сибирский, П — пихта сибирская, Л — липа.

Пробные площади. Дубрава приморская: 1 — леспедцево-разнотравная, 2 — рододендрово-леспедцевая разнотравная; 3 — разнокустарниково-разнотравная; 4 — дубрава лещиновая злаковая; 5—8 — березняк осокоро-папоротниково-разнотравный разнокустарниковый; ельник: 9 — разнотравный, 10 — мертво-покровный, 11 — зеленчуково-волосисто-осоковый, 12 — волосисто-осоковый, 13 — зеленомошно-волосисто-осоковый, 14 — лещиновый волосисто-осоковый, 15 — лещиновый волосисто-осоковый, 16 — папоротниково-кисличный, 17 — зеленомошный; пихтово-еловый: 18 — зеленомошно-папоротниковый, 19 — кустарниково-разнотравный, 20 — разнокустарниково-разнотравный с лианами; 21 — елово-пихтовый разнотравно-моховой; 22 — елово-широколиственно-кедровый разнокустарниково-разнотравный; 23 — широколиственно-кедровый разнокустарниково-разнотравный; кедровник: 24 — осокоро-крупнотравный папоротниковый; 25 — крупнотравный папоротниковый черновой низкогорный.

Пространственная структура лесов из ореха грецкого (*Juglans regia*) изучалась на основе материалов Сары-Челекского заповедника, предоставленных Н. П. Виноградовым. Заповедник расположен в северной части Ошской области (см. рис. 16), и произрастающие в этом районе орехово-плодовые леса относятся к северному массиву плодовых лесов Южной Киргизии. Здесь ореховые леса распространены в лесном (лесостепном) поясе, который простирается от 1100 м (1300) до 2000 м (2200) над уровнем моря [39 и др.].

Картирование древостоев было проведено на девяти пробных площадях (до 1 га), расположенных в поясе распространения ореховых лесов, преимущественно на склонах северной и северо-западной экспозиций. Четыре пробные площади характеризуют орешник коротконожковый пологих склонов и пять пробных площадей — орешник коротконожковый крутых склонов. Средний возраст деревьев 120—150 лет, средняя высота 16—19 м. Первый тип леса, распространенный в среднегорье на слабоиссушаемых пологих склонах, является наиболее продуктивным по плодоношению. В отличие от него, второй тип леса характеризуется более высокими запасами древесины, но плодоношение в нем незначительное. Во всех типах ореховых лесов орех имеет порослево-семенное происхождение, в силу чего насаждения очень разновозрастные. Семенное возобновление ореха происходит достаточно успешно, за исключением мест выпаса скота, где почвы сильно задернованы, а также в условиях заповедности за счет сильного увеличения поголовья диких животных.

В темнохвойных лесах закономерности размещения деревьев изучались в чистых еловых лесах равнинных территорий умеренного климата (Подмосковье и Валдай), горных пихтово-еловых и широколиственно-кедровых лесах Приморского края и кедровых лесах Западного Саяна.

Чистые ельники из ели европейской (*Picea abies*) представлены фитоценозами с простой вертикальной структурой. Для них характерно наличие двух ярусов (древесного и травяного) и слабо развитого подлеска в виде куртин лещины (*Corylus avellana*). В составе древостоя встречается береза (*Betula pendula* и *Betula pubescens*) и осина (*Populus tremula*). Часть пробных площадей (9, 10, 14) была заложена в культурах разного возраста. Нам неизвестно происхождение остальных ельников — естественное или искусственное. Архивные материалы в Малинском лесничестве (Московская область), относящиеся к концу XIX и началу XX столетия, к сожалению, утеряны. В пользу того, что обследованные нами 80—93-летние ельники могут быть старыми культурами, указывают следующие факты: во-первых, относительная одновозрастность деревьев и, во-вторых, наличие на территории лесничества культур ели и сосны примерно того же возраста. С другой стороны, можно предпо-

лагать, что пространственная структура древостоев на тех площадях, где проводилось исследование, является достаточно типичной для 80—120-летних чистых ельников зоны смешанных лесов Подмосковья. Это предположение базируется на том, что, во-первых, для ели присуща способность в течение длительного времени сохранять одновидовые древостои и, во-вторых, к возрасту 80—100 лет уже завершается процесс самоизреживания, полностью заканчивающийся в ельниках к 120 годам. Поэтому при отсутствии активного хозяйственного вмешательства структура искусственных еловых насаждений приближается к структуре лесов естественного происхождения.

Чистые еловые леса заведомо естественного происхождения представлены двумя пробными площадями¹ (16 и 17, табл. 32). Горные пихтово-еловые леса восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня являются смешанными разновозрастными лесами, в древостое которых доминирует ель аянская (*Picea ajanensis*) и пихта белокорая (*Abies neprolepis*). Преобладание ели как основной лесообразующей породы определяется циклом возрастного развития древостоя [135]. Пихта, как правило, находится во втором ярусе, но на отдельных стадиях развития (при распаде полога старших поколений ели) пихта может формировать первый ярус (например, пр. пл. 21). Для древостоя сложных дальневосточных ельников характерна примесь кедра корейского (*Pinus koraiensis*), мелколиственных и широколиственных пород.

Сложная вертикальная структура при участии в древостое широкого набора видов типична также для дальневосточных кедрово-широколиственных лесов (пр. пл. 22 и 23), относящихся к средней климатической фации [89, 90, 135]. Пробные площади 24 и 25² представляют древостой кедровников крупнопалотниковых черногого подпояса ($H=350\div 900$ м) горных темнохвойных лесов избыточно влажной климатической фации Западного Саяна [109, 124]. Эти черневые темнохвойные леса характерны только для Алтае-Саянской горной области [109].

Рассмотрим полученные результаты оценки типов размещения на нескольких примерах.

Как видно из данных, приведенных в табл. 33 и рис. 24, для древостой дубовых лесов в целом выявляется преобладание случайного типа размещения.

Аналогичный тип размещения подтверждается значением коэффициента агрегации ($A=0,80\div 0,74$). Характерно, что случайный тип сохраняется на всех пробных площадях, независимо от степени удаленности от моря, экспозиции и крутизны склона. Чисто качественные оценки приводят к выводу, что в исследуемом районе пожары являются фактором, который способствует

¹ Первичные материалы предоставлены Ю. Г. Пузаченко.

² Первичные материалы предоставлены П. М. Ермоленко.

формированию неравномерного (группового) размещения деревьев.

При более детальном рассмотрении структуры древостоя на пр. пл. 1—4 выявляется регулярный тип размещения для де-

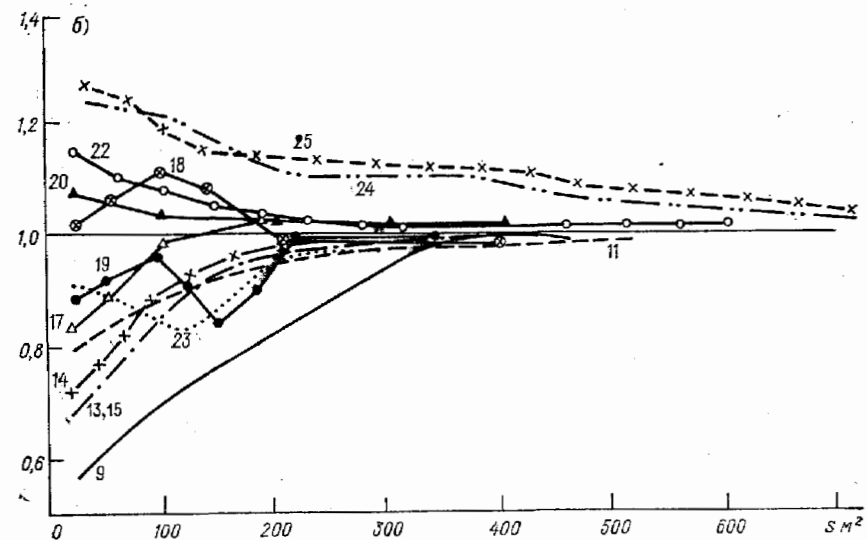
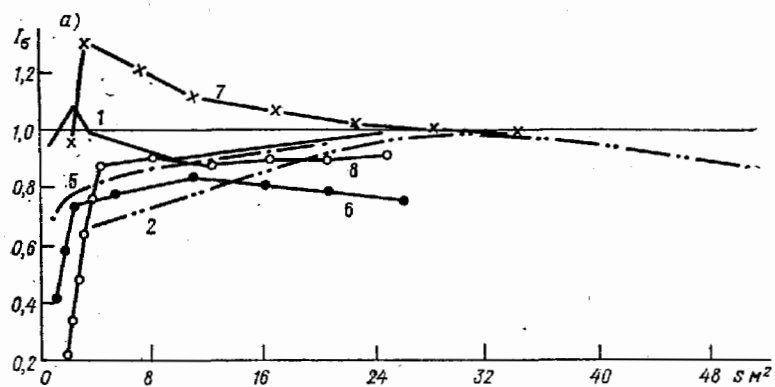


Рис. 24. Изменение I_{σ} для всего древесного яруса.

а — лиственные древостой, б — темнохвойные древостой; цифры у кривых — номера пробных площадей, их описание см. в табл. 32.

ревьев господствующего яруса (табл. 33, 34). Причем для этого яруса $A=0,60 \div 0,70$. В подчиненном ярусе сохраняется случайная структура при некоторой тенденции к контактичному типу (пр. пл. 3 и 4). Данные табл. 34 иллюстрируют путь формиро-

Таблица 33
Величина σ^2/\bar{x} числа стволов для древостоев с господством дуба монгольского

№ пробной площади (см. табл. 32)	Размер учетной площадки, м²			
	1	2	3	25
1	$\frac{1,00}{0,77^*}$	$\frac{1,05}{0,79^*}$	$\frac{1,22}{0,55^*}$	$\frac{1,00}{0,86}$
2	—	$\frac{0,63^*}{0,64^*}$	$\frac{0,85}{0,62^*}$	$\frac{0,81}{0,64^*}$
3	—	$\frac{0,52^*}{0,70^*}$	$\frac{0,78}{0,56^*}$	$\frac{0,89}{0,37^*}$
4	—	$\frac{1,10}{0,73^*}$	$\frac{1,03}{0,93}$	$\frac{0,76}{0,95}$

Примечание. В числителе приведено σ^2/\bar{x} для всего древостоя, в знаменателе — для господствующего яруса; звездочкой (*) отмечены отклонения σ^2/\bar{x} от 1, достоверные с $P \geq 0,95$.

Таблица 34

Величина σ^2/\bar{x} числа стволов для различных ярусов древостоя на пробной площадке 2

Ярус древостоя	Размер учетной площадки, м²		
	4	25	100
Господствующий			
1. $H_d = 15 \div 18$ м	1,00	0,68* (2,01)	0,88 (0,67)
2. $H_d = 11 \div 14$ м	0,86 (1,19)	0,69* (1,95)	0,72 (1,56)
Подчиненный			
3. $H_d = 8 \div 10$ м	0,80 (1,69)	0,93 (0,44)	1,25 (1,40)
4. $H_d = 5 \div 7$ м	0,93 (0,59)	0,98 (0,13)	1,05 (0,28)
Сочетания ярусов			
1 + 2	0,62* (3,22)	0,64* (2,26)	
1 + 2 + 3	0,81 (1,61)	0,68 (2,01)	
1 + 2 + 3 + 4	0,85 (1,27)	0,81 (1,19)	

Примечание. Звездочкой (*) отмечены отклонения σ^2/\bar{x} от 1, достоверные с $P \geq 0,95$. В скобках даны значения I_{ϕ} [формула (27)].

вания случайного размещения для всего древостоя при комбинации упорядоченного относительно друг друга расположения деревьев одного яруса (подъяруса). Видно также, что

комбинация случайных структур (например, при размере учетной площади 4 м²) может дать обратный результат — возникновение общего регулярного типа размещения.

В березовых лесах (табл. 35, рис. 24 и 25) для древостоя в целом также характерен случайный тип размещения. Достоверно групповой тип выявляется только на пр. пл. 7 при размерах учетных площадок 2 и 4 м². Пятна с указанными размерами соответствуют куртинам из более низких деревьев березы с участием осины. В принципе для древостоев порослевого происхождения можно было бы ожидать преобладание именно группо-

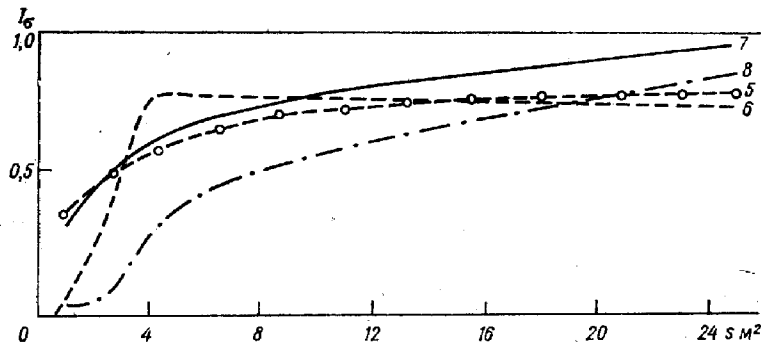


Рис. 25. Изменение I_0 для господствующего яруса древостоя в березовых лесах.

Цифры у кривых — пробные площади, их описание см. в табл. 32.

вого характера структуры. Наличие явно выраженных групп в подобных древостоях неоднократно отмечалось рядом авторов. Однако оценки типа во многом зависят от возраста исследуемых ценозов. Известно, что в березовых лесах порослевого происхождения смыкание крон наблюдается уже к 5—15 годам и в дальнейшем с возрастом происходит изреживание полога. В рассмотренных примерах средний возраст деревьев составлял 18—23 года. К этому времени древесный ярус полностью сформировался в плане заполнения пространства ценоза. Однако дифференциация древостоя еще слабо выражена, выделился только ярус из наиболее высоких деревьев. И дальнейший путь развития горизонтальной структуры зависит от напряженности конкурентных отношений между деревьями господствующего и подчиненного ярусов. За исключением пр. пл. 7, на всех остальных участках для деревьев господствующего яруса выявляется регулярный тип размещения (табл. 35).

В ореховых лесах, в отличие от рассмотренных выше, групповой тип размещения встречается гораздо чаще. Но он характерен для крутых склонов, причем в ряде случаев после

Таблица 35

Оценки типов размещения деревьев в березовых лесах (получены различными методами)

№ пробной площади (см. табл. 32)	Вариант	Относительная дисперсия				Индекс Морсига (рис. 24, 25)	Коэффициент Хопкинса	
		2 м ²		4 м ²			A	тип размещения
		σ^2/\bar{x}	тип размещения	σ^2/\bar{x}	тип размещения			
5	1	0,70	C	0,70	C	0,85	C	
	2	0,50*	P	0,55*	P	0,43**	P	
6	1	0,76	C	0,78	C	1,17	C	
	2	0,60*	P	0,69	C→P	0,60**	P	
7	1	1,33	K	1,44*	K	1,50**	K	
	2	0,68	P	0,70	P	0,32**	P	
8	1	0,67*	C	0,96	C	1,07	C	
	2	0,70*	P	0,70	P	0,59**	P	

Примечание. 1 — весь древостой, 2 — господствующий ярус древостоя; C — случайный тип, P — регулярный, K — конгломератный. Одной звездочкой (*) показаны отклонения σ^2/\bar{x} от 1, достоверные с $P = 0,95$, двумя звездочками (**) — распределение, неслучайное при $P = 0,95$.

Численность основных видов в различных ярусах на пробной площади 18 (по данным В. А. Розенберга)

Ярус	Характеристика	Ель аянская	Пихта белокорая	Береза желтая	Кедр корейский
Подрост (выше 1,3 м)	1	390	104	92	—
	2	76,9	96,1	60,9	—
	3	3,0	3,0	5,8	—
	4	2,6	3,2	9,3	—
Подчиненный ярус (деревья диаметром < 10 см)	1	94	36	ед.	—
	2	59,7	88,9	—	—
	3	8,0	7,8	—	—
	4	6,5	7,5	—	—
II полог древесного яруса, сомкнутость 0,9	1	96	144	144	8
	2	93,5	97,2	100,0	100,0
	3	19,5	22,4	14,4	18,0
	4	17,3	16,5	16,6	12,2
I полог древесного яруса, сомкнутость 0,3	1	28	4	44	8
	2	85,7	100,0	100,0	100,0
	3	34,4	31,5	42,0	44,0
	4	23,5	18,3	22,5	19,8

Примечание. 1 — густота (шт/га), 2 — процент живых экземпляров, 3 — средний диаметр (см), 4 — средняя высота (м).

Таблица 37

Распределение покрытия площади валежом при размере учетных площадок 5 × 5 м и 10 × 10 м (пробная площадь 18)

Размер и число учетных площадок	Частоты	Покрытие, доли единицы					$\chi^2(P)$
		≤ 0,10	0,11—0,30	0,31—0,50	0,51—0,70	≥ 0,71	
5 × 5 м N = 96	Эмпирические	0,177	0,427	0,250	0,104	0,042	3,88 (0,95)
	Теоретические	0,215	0,336	0,336	0,103	0,010	
10 × 10 м N = 24	Эмпирические	0,083	0,292	0,250	0,333	0,042	1,00 (0,90)
	Теоретические	0,120	0,240	0,360	0,240	0,040	

распределения и превышение частот средних классов по сравнению с ожидаемыми частотами позволяют говорить о регулярности в размещении всходов, т. е. горизонтальную структуру на уровне всходов и мелкого подроста можно рассматривать как регулярную с мелкими пятнами, размеры которых соответствуют размерам валежа.

Размещение по площади среднего подроста (высотой 0,25—1,30 м) всех видов явно контактно. Величина σ^2/\bar{x} при размере учетных площадок 5 × 5 м достигает 3—10. Проверка на наличие ложноконтактно распределения [31] дала

процедуры «снятия» ложноконтактно распределения [31] выявляется случайный тип (так, например, при размере учетной площадки 4 м² $\sigma^2/\bar{x} = 1,28$, после «снятия» ложноконтактно распределения $\sigma^2/\bar{x} = 0,87$; аналогично случайный тип подтверждается значением A, равным 0,87). На пологих склонах преобладает случайный тип размещения с некоторой слабо выраженной тенденцией к регулярности, которая проявляется при использовании малых размеров учетных площадок.

Наиболее типичным примером, иллюстрирующим формирование общего случайного типа размещения растений в ценозе, является структура сложного ельника на пр. пл. 18.¹ Для этой пробной площади была составлена серия карт, отражающих горизонтальную структуру фитоценоза в нескольких горизонтальных сечениях, начиная от всходов и подроста (высотой до 10 см) до господствующего яруса древостоя.

Соотношение численности видов не остается постоянным во всех ярусах. Более 90 % всходов составляют лиственные породы (береза желтая и клен желтый). Элиминация всходов березы и клена приводит к резкому сокращению численности этих видов уже в мелком и среднем подросте (высотой до 1,3 м). Отпад березы продолжается и в подъярусе крупного подроста (табл. 36). Выжившие экземпляры березы входят во II и I пологи древесного яруса; у ели и пихты основное сокращение численности наблюдается в группе подроста высотой до 50 см. Далее ель интенсивно отпадает в подчиненном ярусе древостоя и крупном подросте, доминируя во II пологе древесного яруса. Снижение численности живых экземпляров ели в I пологе древостоя связано уже с распадом старшего поколения деревьев (табл. 36).

При визуальном просмотре карты всходов и мелкого подроста (высотой до 10 см) выявляется очевидная приуроченность скопления всходов к валежу. Тенденция скопления всходов на богатом субстрате в дальневосточных лесах неоднократно отмечалась в литературе [89, 90, 97, 135]. Однако на конкретном примере видимая контактно не подтвердилась результатами статистической обработки. Не имея возможности оперировать численностью всходов и, естественно, расстояниями между особями при анализе размещения, мы использовали характеристику покрытия учетных площадок валежом (табл. 37).

Сравнение эмпирических распределений покрытия с нормальным законом показало, что на площадях в 100 м² валеж (и соответственно всходы и мелкий подрост) размещен случайно. При большей детализации (при размере площадок 25 м²) распределение покрытия валежом достоверно отличается от нормального закона. Положительная асимметрия эмпирического

¹ Первичные данные предоставлены В. А. Розенбергом.

отрицательные результаты. Коэффициент агрегации в зависимости от вида и высоты подроста изменяется от 1,40 до 8,22.

Общий контагиозный характер размещения сохраняется и для яруса, объединяющего крупный подрост и подчиненный ярус древостоя. Однако здесь уже наблюдаются различные тенденции в типе размещения отдельных видов. Доминирующие виды в этом ярусе (ель и пихта) при больших размерах учетных площадок (100 м²) распределены группами. Так, для пихты $\sigma^2/\bar{x} = 1,65$, для ели 2,04. При меньших размерах (25 м²) характер

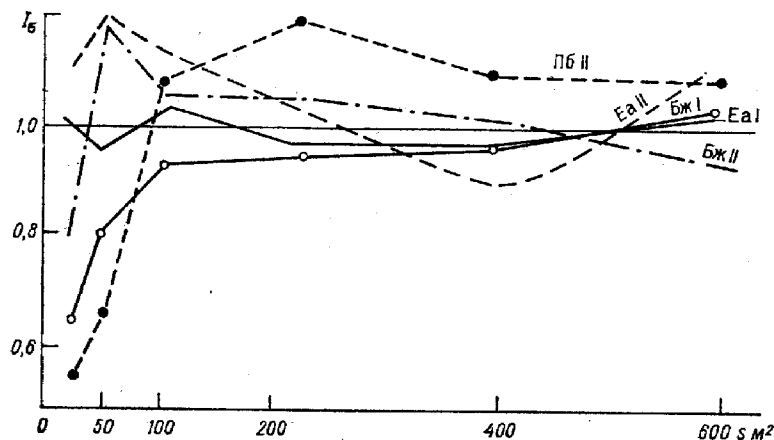


Рис. 26. Изменение I_{σ} для деревьев I и II полога древостоя на пробной площади 18.

Усл. обозначения см. в табл. 32.

размещения ели приближается к случайному, характер размещения пихты остается групповым. Для ели $A = 1,14$, что позволяет склоняться в сторону случайного распределения деревьев этого вида (точнее, контагиозного со случайной структурой внутри пятен). Для пихты $A = 1,82$. В этом случае групповой тип размещения можно считать доказанным на основе сходимости конечных оценок по двум методам.

Во II пологе древесного яруса (деревья со средней высотой 12—17 м) уже преобладает случайный тип размещения. Коэффициенты A для различных пород равны:

Ель аянская	Пихта белокорая	Береза желтая	Клен желтый	Клен зеленокорый	Все породы
0,86	0,42	0,46	2,23	1,39	0,80

У пихты и березы выявляется тенденция к регулярному типу, у ели — к случайному, это подтверждается и на основе индекса Морисита (рис. 26). Доминанты I полога древесного яруса ель и береза распределены по площади случайно.

Аналогичные закономерности в строении древостоя были выявлены в кедровниках Западного Саяна и широколиственно-кедровых лесах Приморского края, для которых характерны разновозрастность древостоя и сложный видовой состав (рис. 27).

В большой группе равнинных и горных ельников (пр. пл. 9—13, 15, 16) был выявлен регулярный тип размещения деревьев. Так как, по мнению большинства исследователей, этот

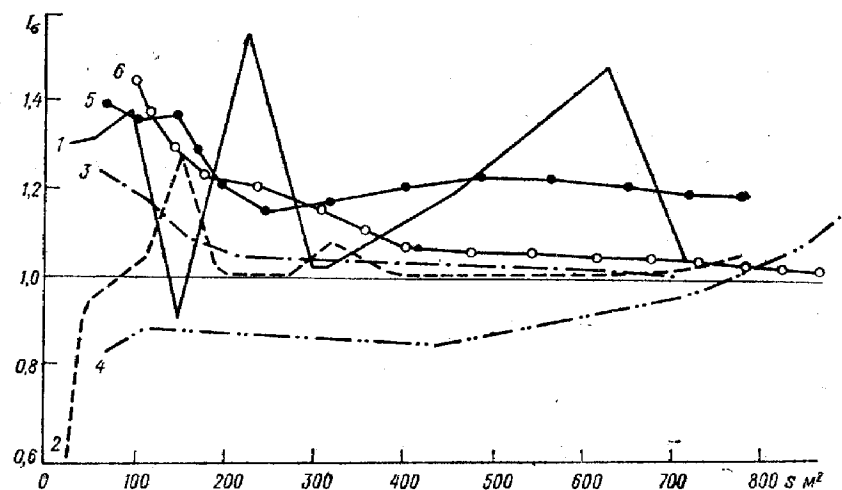


Рис. 27. Изменение I_{σ} в зависимости от размера площадки для различных ярусов в кедровниках Западного Саяна.

Господствующий ярус: 1 — пихта, 2 — кедр, пробная площадь 24; 3 — пихта, 4 — кедр, пробная площадь 25; II ярус: 5 — пихта, 6 — кедр; описание пробных площадей см. в табл. 32.

тип размещения практически не встречается в природных сообществах, для указанных пробных площадей оценки типа размещения были проверены с помощью различных методов. Приведенные ниже примеры иллюстрируют полученные результаты для 80—140-летних ельников, ибо именно в этом возрасте можно ожидать явно выраженную неоднородность за счет дифференциации древостоя.

Пробная площадь 13. Общий регулярный тип размещения для всего древостоя подтверждается значениями коэффициента агрегации Хопкинса и сравнением с пуассоновским распределением эмпирического распределения численности в пробном круге для случайных точек (табл. 38).

История возникновения насаждения на этой пробной площади неизвестна. Допустим, что древостой имеет искусственное происхождение. В этом случае регулярность должна возрастать при анализе типа размещения только для деревьев ели

Таблица 38

Оценки типа размещения деревьев в ельнике зеленомошно-волосисто-осоковом (пробная площадь 13)

Порода	Относительная дисперсия числа стволов, 5 × 5 м		Пробный круг (случайные точки)		Коэффициент Холквиста	
	σ^2/\bar{x}	тип размещения	σ^2/\bar{x}	тип размещения	$\frac{A}{\bar{x}}$	тип размещения
Все деревья	0,52*	Регулярный	0,50*	Регулярный	0,60* 0,37	Регулярный
Ель (живые деревья)	0,70*	"	0,61*	"	0,56* 0,36	"
Ель (живые и сухие деревья)			0,88	Случайный	0,58* 0,37	"
Ель (сухие деревья)	0,85**					
Береза, осина, дуб (живые деревья)	0,83	"				

* Отличия от 1 достоверны с $P \geq 0,95$.** При обработке снято лишнее число «пустых» площадок по методике В. И. Василевича [31]. При сравнении с распределением Пуассона с помощью χ^2 получен случайный тип, при оценке значимости σ^2/\bar{x} с помощью критерия Блэкмана получено подтверждение регулярного типа.

(совместно живых и сухих особей). Однако различия между оценками для всех видов и только для ели не достоверны. Интересно, что при этом наблюдается регулярный тип и в размещении лиственных пород (табл. 39).

Таблица 39

Распределение деревьев осины, березы и дуба на пробной площади 13 и сравнение его с распределением Пуассона (размер учетной площади 5 × 5 м)

Частоты	Число деревьев на площади 5 × 5 м				
	0	1	2	3	χ^2
Эмпирические ¹	280	111	8	1	19,1
Теоретические	291	85	15	2	

¹ Проверка на ложноконтагиозное распределение [31] дала отрицательный результат.

Предположение о том, что конкретный древостой является старой культурой ели с подсадкой лиственных пород, нельзя рассматривать как реальную гипотезу, так как деревья осины и березы более молодые, чем основное поколение ели и к тому же разновозрастные. Если придерживаться гипотезы об искусственном происхождении конкретного насаждения ели, то заданный при посадке регулярный тип сменился случайным. Об этом свидетельствует характер совокупного распределения живых и сухих особей ели. Далее процесс дифференциации деревьев вновь способствовал возникновению упорядоченной структуры, при этом места выпада ели заполнялись листвен-

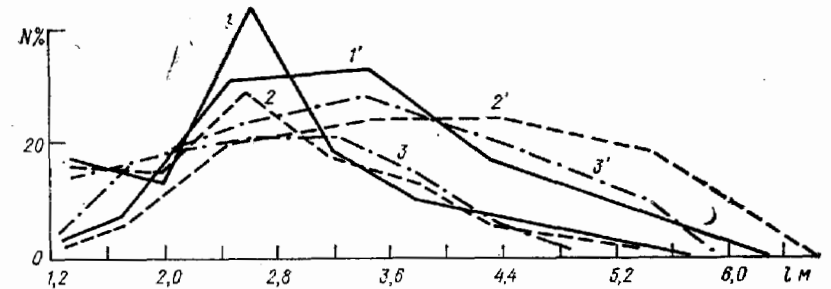


Рис. 28. Распределения наименьших расстояний между деревьями на пробных площадях 13 (1—3) и 15 (1'—3').

1, 1' — с учетом всех живых деревьев; 2, 2' — только живые деревья ели; 3, 3' — живые и сухие деревья ели; описание пробных площадей см. в табл. 32.

ными породами. Если допустить естественное происхождение ельника и рассматривать совокупное распределение живых и сухих особей как отражающее структуру в некотором прошлом, то и в этом случае результатом дальнейшего развития древостоя является регулярный тип размещения.

Пробная площадь 15. При просмотре плана проекций крон в некоторых местах пробной площади видны участки сохранившихся рядов, т. е. реально предположение, что конкретный ельник является старой культурой. Рисунок размещения деревьев здесь более сложный, чем на пр. пл. 13. Наряду с остатками рядов елей имеется несколько разреженных участков и участков со скоплением мелколиственных пород. Минимальное расстояние между живыми деревьями ели в сохранившихся рядах составляет 1,4—1,2 м, с учетом живых деревьев ели и сухостоя — около 0,7 м. Между рядами елей расстояние равно 5 м.

Значение σ^2/\bar{x} для площадок 5 × 5 м пробного круга и коэффициента агрегации позволяет классифицировать тип размещения живых деревьев ели как регулярный (табл. 40).

В то же время распределение всех особей ели (живых и сухих) при сохранении некоторой тенденции к регулярному больше соответствует случайному типу размещения (рис. 28),

Таблица 40

Оценки типа размещения деревьев в ельнике лещино-волосисто-осоковом (пробная площадь 15)

Порода	Относительная дисперсия числа стволов, 5×5 м		Пробный круг (случайные точки)		Коэффициент Хопкинса	
	σ^2/\bar{x}	тип размещения	σ^2/\bar{x}	тип размещения	A/x	тип размещения
Все деревья	0,43	Регулярный	0,58	Регулярный	$\frac{0,47}{0,32}$	Регулярный
Ель (живые деревья)	0,53	"	0,61	"	$\frac{0,47}{0,32}$	"
Ель (живые и сухие деревья)			0,64 **	Случайный с тенденцией к регулярному	$\frac{1,08}{0,52}$	Случайный
Ель (сухие деревья)	1,02* (1,16)	Случайный (групповой)				
Береза, осина (живые деревья)	1,00* (1,17)	Случайный (групповой)	1,12	Случайный	$\frac{1,19}{0,55}$ **	Случайный с тенденцией к групповому

* При проверке сняты лишние «пустые» площадки (в скобках дана относительная дисперсия для распределения без снятия ложноконтагиозного эффекта).

** Отклонения от случайного достоверны с $P=0,90$.

т. е. ретроспективно можно представить путь развития структуры древостоя от регулярного типа к случайному и затем снова формирование тенденции к регулярному. Береза и осина, выросшие в местах выпадения елей, не нарушают общей закономерности горизонтальной структуры, хотя непосредственно в размещении мелколиственных пород выявляется тенденция к групповому типу (табл. 40).

Пробная площадь 16. Общий регулярный тип размещения деревьев в чистом равнинном ельнике естественного происхождения (см. рис. 24) подтверждается также коэффициентом Хопкинса, величина которого равна 0,57 ($x=0,36$; $P=0,99$), и характером распределения числа деревьев, полученным с помощью пробного круга при наложении его в случайных точках.

Сравнение эмпирического распределения числа деревьев с пуассоновским показало статистическую значимость существующих отклонений (табл. 41).

Таблица 41

Распределение числа деревьев ели, полученное методом пробного круга (пробная площадь 16)

Характеристика	Число деревьев в пробном круге				χ^2
	0	1	2	3	
Частоты эмпирические	16	29	6	—	11,25
	$\frac{0,314}{0,314}$	$\frac{0,569}{0,569}$	$\frac{0,117}{0,117}$		
теоретические при распределении Пуассона	23	18	7	3	
Доверительные пределы для биномиального распределения при $P=0,95$	0,437—0,207	0,704—0,454	0,219—0,052		

Примечание. В числителе дроби дано число случаев, в знаменателе — вероятность.

Пробная площадь 19. Эта площадь была заложена в типичном для переходной зоны (между средней и северной фациями дальневосточных ельников) пихтово-еловом лесу на северном среднекрутом склоне. Видовой состав фитоценоза значительно отличается от дальневосточных сложных ельников, рассмотренных выше (пр. пл. 18). Здесь уже отсутствует примесь широколиственных пород, вместо березы желтой в виде единичных экземпляров встречается береза белая, в подлеске исчезают лианы и широколиственные породы. Древостой довольно простого сложения: отчетливо выделяются два яруса — господствующий и подчиненный. В обоих ярусах содоминантом ели аянской является пихта белокорая. По своей структуре ельник здесь скорее напоминает ельники северной и средней тайги ЕТС. При анализе рисунка размещения древостоя дополнительно был выделен господствующий ярус (рис. 29), видовой состав которого 6Еа4Пб. Для всего древостоя господствующего древесного яруса и отдельно для особей (табл. 42, 43), входящих в этот ярус, установлен регулярный тип размещения. Распределение числа деревьев пихты на основе σ^2/\bar{x} , I_σ и пробного круга классифицируется как соответствующее случайному типу. Бесплощадочный метод учета показал тенденцию к регулярному типу в размещении пихты (но с относительно низким доверительным уровнем $P=0,90$).

Оценка типов размещения деревьев на пробной площади 19 с помощью различных методов

Ярус древесного яруса, порода	Относительная дисперсия площадки, 5 × 5 м		Пробный круг (случайные точки)		Коэффициент Хопкинса	
	σ^2/\bar{x}	тип размещения	σ^2/\bar{x}	тип размещения	A/x	тип размещения
Общий все деревья	0,74	Регулярный	0,67	Регулярный	0,79 (0,44)	Регулярный
ель аянская	.	.	.	.	0,77 (0,43)	"
пихта белокорая	.	.	.	.	0,95 (0,49)	Случайный
Господствующий все деревья	0,62	Регулярный	0,58	Регулярный	0,44 (0,31)	Регулярный
ель аянская	0,66	"	0,51	"	0,72 (0,42)	"
пихта белокорая	0,92	Случайный	0,64	Случайный с тенденцией к регулярному	0,78 (0,44)	"

Таблица 43

Сравнение эмпирических распределений числа деревьев с распределением Пуассона (пробная площадь 19)

Ярус древесного яруса, порода	Частоты	Число деревьев в пробном круге					$\chi^2 (P)$	
		0	1	2	3	4		5
Общий все деревья	Эмпирические	35	73	43	11	—	—	11,71 (0,99)
	Теоретические	49	59	35	14	4	1	
Господствующий все деревья	Эмпирические	31	50	18	1	—	—	10,97 (0,99)
	Теоретические	41	36	16	4	1	2	
ель аянская	Эмпирические	26	49	25	—	—	—	9,88 (0,99)
	Теоретические	37	37	18	6	2	—	
пихта белокорая	Эмпирические	34	45	20	1	—	—	3,62 (0,94)
	Теоретические	41	36	16	4	1	2	

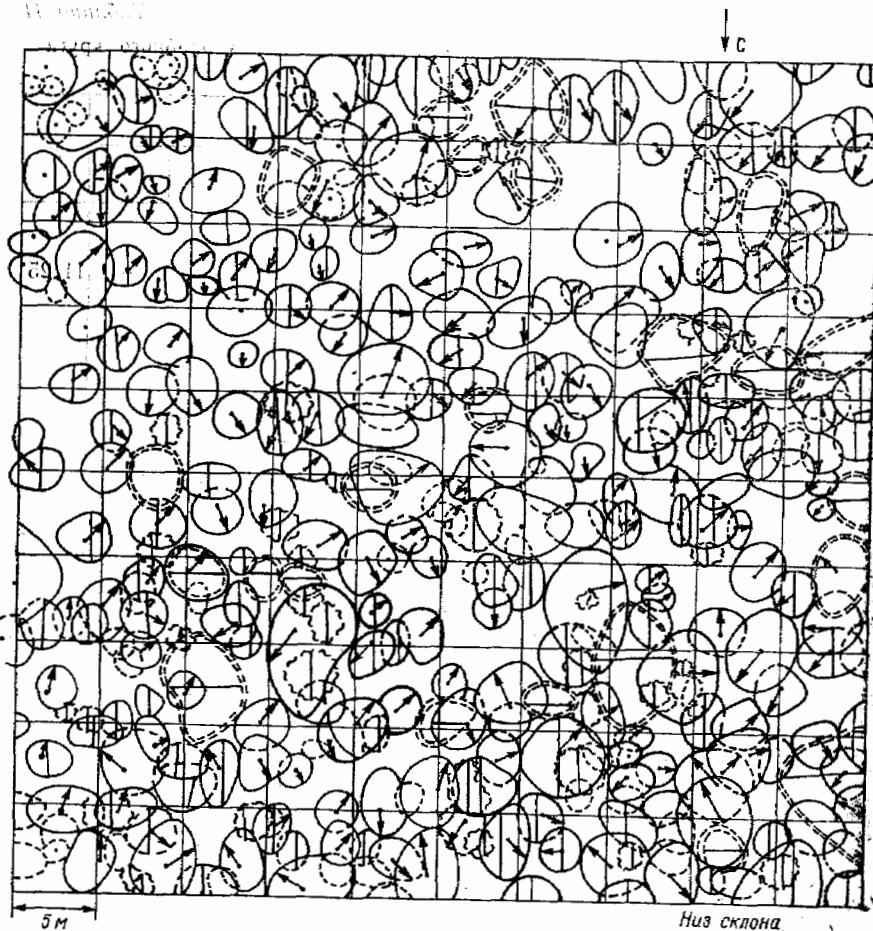


Рис. 29. План проекций крон древесного яруса на пробной площади 19 (см. табл. 32).

1 — господствующий ярус, 2 — подчиненный; стрелками обозначен контур кроны.

С целью дополнительной проверки выявленных закономерностей в размещении ели и пихты была проведена аппроксимация реального размещения деревьев по положительному биномиальному распределению и закону Пуассона. При этом параметры распределений использовались в трактовке Т. А. Нильсона [114], который предлагает использовать в качестве критерия типа размещения соответствие функций вероятности встречи i -го числа стволов при изменении размера учетной площадки трем теоретическим распределениям (биномиальному, пуассоновскому и отрицательному биномиальному). При соответствии распределения закону Пуассона вероятность p_i встречи i -го числа стволов на площади определяется как

$$p_i(s) = \frac{\lambda s^i}{i!} e^{-\lambda s}, \quad (33)$$

где λ — средняя плотность (число стволов на единице площади). Для регулярного типа размещения (положительный биномиальный закон распределения)

$$p_i(s) = \frac{N!}{i(N-i)!} (1-\lambda\sigma)^{N-i} (\lambda\sigma)^i. \quad (34)$$

Для группового типа размещения (отрицательный биномиальный закон распределения)

$$p_i(s) = \frac{(N-1+i)!}{i!(N-1)!} (\lambda\sigma)^i (1+\lambda\sigma)^{-N-1}. \quad (35)$$

В формулах (34) и (35) N — максимальная плотность насаждения; $N=s/\sigma$, где σ — площадь, на которой может расти одно дерево. Причем σ находится из соотношения $\sigma^2/\bar{x}=1-\lambda\sigma$ для формулы (34) и $\sigma^2/\bar{x}=1+\lambda\sigma$ для формулы (35).

Результаты вычислений по формулам (33) и (34) представлены на рис. 30 а, б. При расчете для ели значение λ принималось равным 0,033—0,034 экз/м², величина σ оставалась практически постоянной для s , равной 25 и 50 м² (9,7 и 9,3 м²), увеличиваясь при $s=100$ м² до 11,5 м². Хорошее согласование эмпирического и теоретического распределений для ели подтверждает регулярность в рисунке размещения деревьев. Для пихты эмпирическое распределение удовлетворительно аппроксимируется законом Пуассона (рис. 30 б) при $\lambda=0,0262$ экз/м². Кривые распределений наименьших расстояний (рис. 31) существенно отличаются от нормального закона, однако на основе величин третьего и четвертого моментов классифицируются как принадлежащие к I типу кривых Пирсона [106]¹.

¹ Е. А. Садовничей также было установлено соответствие I типу кривых Пирсона эмпирических распределений наименьших расстояний между деревьями в горных темнохвойных лесах Западного Саяна [142, 143].

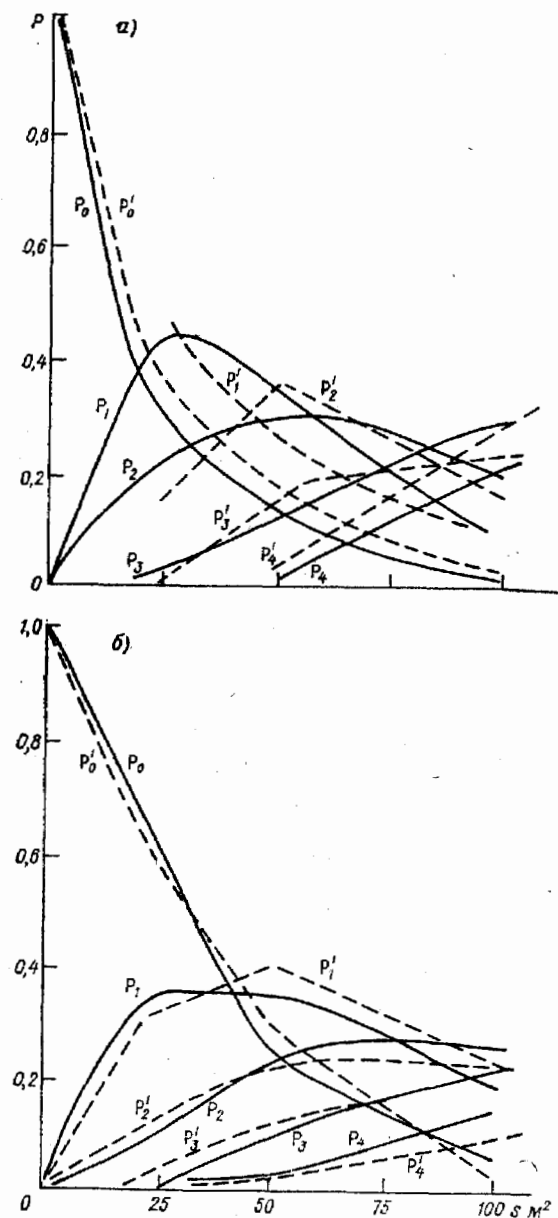


Рис. 30. Изменение вероятности встречи числа деревьев господствующего яруса на пробной площади 19 в зависимости от размера учетных площадок.

а — ель аянская, регулярный тип размещения [см. формулу (34)]; б — пихта белокорая, случайный тип размещения [см. формулу (33)]; p — расчетные данные, p' — фактические.

Таким образом, на основе нескольких методов горизонтальную структуру древостоя на пр. пл. 19 в целом можно рассматривать как соответствующую регулярному типу.

Проведенный анализ карт-схем показал, что случайный тип размещения особей является наиболее распространенным типом горизонтальной структуры древесного яруса. Чем больше видов участвует в образовании древостоя, тем больше вероятность формирования случайных структур, что вполне логично объясняется заполнением микронш экологического пространства.

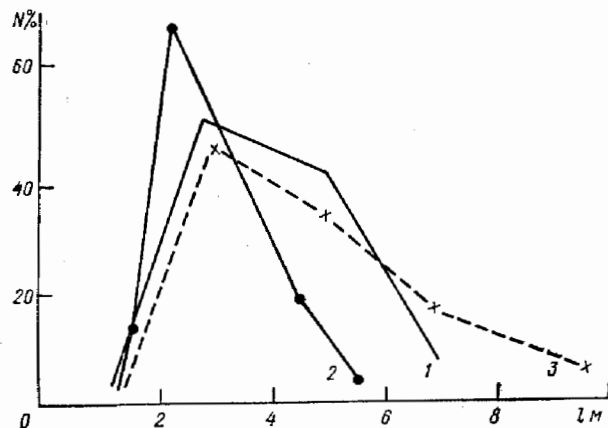


Рис. 31. Распределение наименьших расстояний между деревьями на пробной площади 19.

1 — весь древостой, 2 — ель аяская, 3 — пихта белокорая.

Тенденция к регулярному типу размещения проявляется в монодоминантных сообществах (реже в олигодоминантных, например, при содоминировании ели и пихты) или в господствующем ярусе древостоя. Контагиозность в размещении выражена наиболее сильно в подчиненных ярусах, в отдельных случаях (например, в орехово-плодовых лесах на крутых склонах) групповой тип размещения характерен для всего древостоя.

Следствием комбинации различных типов структур (регулярных и групповых) в различных ярусах является также формирование общего для всего древостоя случайного типа размещения.

Как и следовало ожидать, рассмотренные выше данные свидетельствуют об отсутствии принципиальных различий в горизонтальной структуре равнинных и горных лесов, произрастающих в оптимальных условиях тепло- и влажорегима. Это важный вывод с позиций дальнейшей интерпретации радиационного режима горных лесов. Он, несомненно, важен и в экологическом

плане, ибо полученный результат свидетельствует в пользу того, что структура фитоценозов независимо от условий их произрастания определяется достаточно общими процессами саморегуляции системы РП.

Следует подчеркнуть еще один интересный момент, а именно наличие регулярного типа размещения в естественных древостоях, где упорядоченность структуры выявляется при более детальном анализе — выделении господствующего яруса или рассмотрении типа размещения отдельно для различных пород.

II.2.3. К вопросу о причинах формирования различных типов размещения деревьев

Способ размножения растений — это первая причина, определяющая будущий рисунок размещения особей в фитоценозе. Если семена растений разносятся ветром, можно ожидать, что на начальных стадиях будет формироваться случайный тип. Порослевое размножение, разнесение семян птицами, мелкими животными и т. п. предопределяет образование пятен всходов. Только при искусственной посадке в начале формирования ценоза задается регулярный тип структуры. Дальнейшее развитие структуры определяется действием абиогенных и биогенных факторов [67, 84, 85, 126, 187, 188, 196 и др.].

Элиминация всходов и мелкого подроста связана с напряженностью конкурентных отношений с растениями нижних ярусов [51, 89, 97, 196, 262]. Подрост и отстающие в росте особи находятся под воздействием растений верхних ярусов (табл. 44), и в пределах одного яруса растения вступают во взаимодействия с особями внутри яруса. Здесь может наблюдаться как процесс самоизреживания, так и взаимная толерантность [42, 84, 86, 196, 262 и др.]. Направленность конкурентных отношений и их напряженность определяют формирование рисунка размещения на различных стадиях развития растительных сообществ.

Считается, что в горных лесах основным процессом, определяющим тип размещения деревьев, является конкуренция за водно-минеральные ресурсы [67, 117, 126, 134]. Так как от крутизны склона, микроформ рельефа существенно зависит мощность почвенного горизонта, интенсивность стоковых процессов, влагозапасы в почве и ее термический режим, то конкурентные отношения складываются на фоне пространственной неоднородности и прежде всего эдафических условий. Отсюда следует априорный вывод о преобладании контагиозного типа размещения в горных лесах. Однако если рассматривать не экстремальные условия, то оказывается, что численность деревьев и ее варьирование по пространству в меньшей степени связано с изменением микрорельефа, чем с внутренними ценотическими отношениями (табл. 45).

Распределение обилия подроста высотой 0,25—1,30 м в зависимости от видового состава полога крупного подроста и подчиненного древесного яруса (пробная площадь 18, размер учетных площадок 5×5 м)

Характеристика полога	Подрост, 0,25—1,30 м	Обилие подроста высотой 0,25—1,30 м		
		отсутствие	единичное	среднее
Отсутствие	1	0,347+	0,522	0,131
	2	0,521	0,391+	0,088+
Смесь хвойных и лиственных пород	1	0,240	0,520+	0,240+
	2	0,666	0,286	0,048+
Преобладание хвойных пород	1	0,444+	0,500	0,056
	2	0,722+	0,278	—
Преобладание лиственных пород	1	0,214	0,500	0,286+
	2	0,750+	0,250	—
Общее распределение	1 (N=94)	0,298	0,511	0,191
	2 (N=86)	0,662	0,302	0,036

Примечание. 1 — хвойные породы, 2 — лиственные. Знаком плюс (+) отмечены наиболее вероятные характеристики обилия среднего подроста при различном составе полога крупного подроста и подчиненного древесного яруса. N — число площадок 5×5 м.

Так, из рис. 32 видно, что на площади 100 м² наиболее вероятно произрастание одного дерева кедра господствующего яруса. При этом распределение отдельных особей практически не зависит от крутизны и формы склонового участка. Следствием этого является случайный (или полурегулярный) тип размещения, выявленный на s=100 м² (см. рис. 27). Увеличение зависимости между численностью деревьев с меньшими размерами жизненного пространства (пихты, кедр в подчиненном ярусе и т. п.) от микроформ рельефа обуславливает формирование пятен при этом же размере учетной площадки (см. рис. 27). Причем скопление деревьев пихты приурочено либо к вогнутым, либо ровным формам склона (рис. 32). Но в то же время изменение численности пихты однозначно связано с численностью кедр (рис. 33).

Не останавливаясь подробно на экологических аспектах вопроса, подчеркнем, что результаты анализа зависимостей между численностью пород в различных ярусах рассмотренных фитоценозов подтверждают первостепенное значение ценотических отношений в формировании пространственной структуры. Это означает, что влияние абиогенных факторов реализуется через сложную цепь внутри- и межвидовых связей в системе РП. Наиболее интенсивное преобразование и ослабление факторов среды должно происходить в сформировавшихся сообществах, для которых характерно максимальное заполнение фитоэлемен-

Нормирование меры сопряженности K' между численностью деревьев и некоторыми факторами (пробная площадь 25)

Ярус древостоя	Порода	Фактор	Размер учетной площадки, м		
			10 × 10	20 × 20	40 × 40
Господствующий	Кедр	1	0,028	0,118	0,195
		2	0,006	0,039	0,168
	Пихта	1	0,040	0,048	0,007
		2	0,058	0,055	0,033
		3	0,076	0,064	0,061
	Подчиненный	Кедр	1	0,050	0,021	0,138
2			0,020	0,030	0,090
4			0,083	0,090	0,058
Пихта		1	0,077	0,058	0,035
		2	0,115	0,167	0,097
		4	0,098	0,106	0,084

Примечание. Величина K' характеризует отношение общего количества состояний двух компонент относительно максимально возможного:

$$K' = \frac{2^{T(A, B)} - 1}{2^{H_{\min}} - 1}, \quad (36)$$

где $T(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B)$, $H(A) = -\sum p(a_i) \log p(a_i)$, $H(B) = -\sum p(b_j) \log p(b_j)$ — неопределенность (или энтропия) состояний a_i и b_j из совокупности A и B; $H(A, B) = -\sum \sum p(a_i, b_j) \log p(a_i, b_j)$ — совместная неопределенность распределений A и B; $p(a_i, b_j)$ — совместная вероятность комбинаций двух состояний; $T(A, B)$ — сопряженность в двухкомпонентной системе A и B; H_{\min} — максимально возможное состояние из $H(A)$ и $H(B)$ [96, 128, 129].

Факторы: 1 — крутизна склона, 2 — форма профиля склона, 3 — численность деревьев кедр господствующего яруса, 4 — общая численность деревьев господствующего яруса.

тами экологического пространства. В силу комбинации видов с выборочной чувствительностью к различным факторам такое сообщество является наиболее инвариантной системой по отношению к изменению факторов среды. Структура подобной системы в целом соответствует случайному типу (т. е. вероятность встречи особи в какой-либо точке пространства не зависит от наличия особи в соседней точке). Это положение иллюстрирует кривая 1 на рис. 34, построенном на основе коэффициента автосопряженности (по смыслу близок к автокорреляционной функции) [96, 129] между численностью деревьев на площадках при различном удалении их друг от друга.

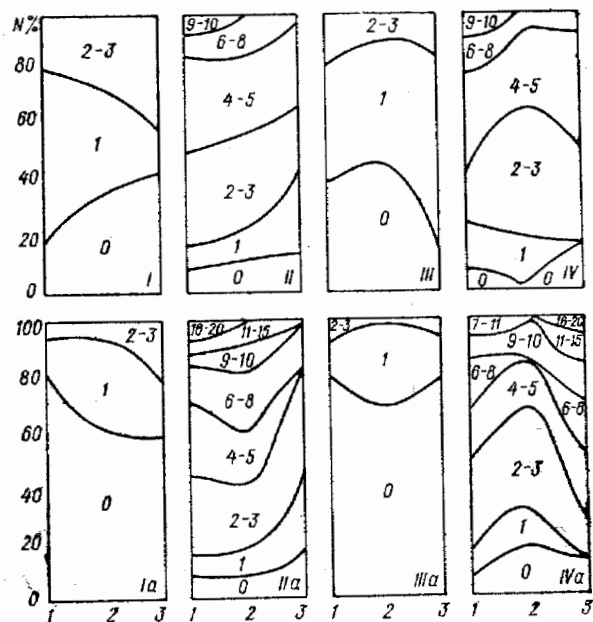


Рис. 32. Распределение числа стволов кедра (I, Ia, III, IIIa) и пихты (II, IIa; IV, IVa) в зависимости от крутизны (I, II) и формы профиля склона (III, IV).

I—IV) господствующий ярус. Ia—IVa) подчиненный; крутизна склона: 1) $\leq 5^\circ$, 2) $6-10^\circ$, 3) $10-20^\circ$; форма профиля склона: 1 — ровно, 2 — выпуклый, 3 — вогнутый. Пробная площадь 25 (см. табл. 32), размер учетных площадок 10×10 м; цифры в поле рисунка — число стволов.

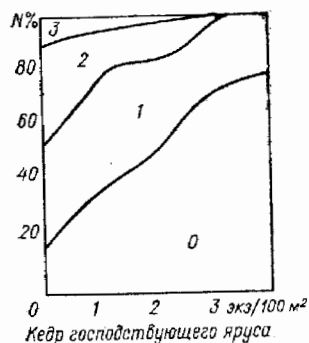


Рис. 33. Распределение числа стволов кедра в подчиненном ярусе в зависимости от числа стволов кедра в господствующем.

Пробная площадь 25 (см. табл. 32), размер учетных площадок 10×10 м; цифры в поле рисунка — число стволов.

Коэффициент автосопряженности I_τ (нит) определяется с помощью информационных функций [96, 120]:

$$I_\tau = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \ln x_{ij} - \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i - \sum_{j=1}^n x_j \ln x_j + N \ln N, \quad (37)$$

где N — объем выборки, x_i — частота i -го состояния из A , x_j — частота j -го состояния из B , x_{ij} — частота перекомбинаций i -го состояния из A и j -го состояния из B . В конкретном случае состояния A и B соответствовали численности деревьев на площадках, удаленных на расстояние τ . Аналогично коэффициент I_τ можно использовать для оценки взаимосопряженности (например, при рассмотрении зависимостей между численностью различных пород).

Однако из того же рисунка видно, что при анализе сопряженности между численностью отдельных видов или деревьев в раз-

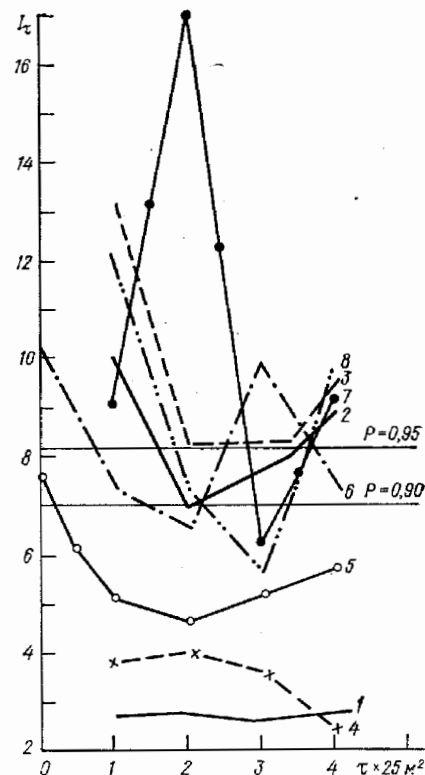


Рис. 34. Изменение сопряженности между числом деревьев при различном удалении площадок ($s = 25$ м²) друг от друга.

1) I и II полог на пробной площади 18; пробная площадь 19; 2) господствующий ярус, 3) ель господствующего яруса, 4) пихта господствующего яруса, 5) взаимосопряженность между числом деревьев ели и пихты, 6) то же между общим числом стволов ели и пихты господствующего и подчиненного ярусов; 7) ель на пробной площади 13; 8) ель на пробной площади 18.

личных ярусах в ряде случаев достоверно выявляется неслучайный тип отношений, который и определяет характер взаимной упорядоченности в размещении особей.

В оптимальных условиях водно-минерального питания и термического режима можно предполагать, что упорядоченность горизонтальной структуры есть следствие реализации конкурентных отношений за световое довольствие. Влияние солнечной радиации на фотоморфогенез отдельного фитоэлемента и растения доказано в биологической литературе [102, 164, 175]. Однако роль радиации как фактора, регулирующего структуру

леса на ценотическом уровне, мало изучена, хотя вся практика лесного хозяйства фактически построена на контролируемых изменениях радиационного режима (например, [85 и др.]).

Если в качестве гипотезы принять, что взаимное затенение регулирует пространственную структуру ценоза, то особи в сформировавшемся древостое должны находиться друг от друга на расстоянии, исключающем влияние взаимного затенения, при котором может происходить подавление физиологических процессов. При этом степень отрицательного воздействия зависит от светолюбия вида и возраста особи. Кроме того, следует учесть, что физиологическая значимость затенения в различные часы дня и в разных частях кроны не одинакова. Так, например, известно, что в кроне ели наибольшая продукция создается в верхней трети кроны и суммарный газообмен за год в верхней половине составляет 70 % общего газообмена кроны [10, 182, 265]. Из немногочисленных данных о световых кривых газообмена для взрослых деревьев ели следует, что его высокий уровень наблюдается в широком диапазоне радиационных условий [10, 252, 265, 279, 286]. Нижний предел освещенности, соответствующий положению компенсационного пункта (когда интенсивность поглощения CO_2 равна выделению CO_2 в процессе дыхания), варьирует в зависимости от световой структуры хвои (т. е. возраста и положения ее в кроне). По данным Е. А. Алексеева [10], снижение освещенности в нижней части кроны ниже 2 тыс. лк приводит к уменьшению интенсивности фотосинтеза. По данным Шульца и др. [279], в кроне 90-летней *Picea abies* компенсационный пункт отмечается при интенсивностях около (и ниже) 15 тыс. лк. Так как первая цифра получена с помощью радиометрического метода и характеризует «потенциальный фотосинтез», а вторая — наблюдаемый, то в дальнейших расчетах мы использовали значение нижнего предела освещенности, равное 15 тыс. лк.

Согласно выдвинутой гипотезе, расстояния между деревьями должны быть связаны с нижним пределом освещенности. Для проверки этого были проведены следующие расчеты. В районе Подмосквья 15 тыс. лк составляют примерно 20 % освещенности открытого места в середине дня при средних условиях облачности в летний период. Такой режим формируется при удалении от кроны ели на расстоянии, равное $0,12-0,13H_{кр}$ при $h_{\odot} = 45^{\circ}$ и $0,4H_{кр}$ при $h_{\odot} = 30^{\circ}$ (рис. 35). Далее на основе этих отношений и измерений $H_{кр}$ для каждого дерева на пр. пл. 13 (см. табл. 32) были найдены расчетные расстояния от ствола до кроны соседнего дерева по направлению падающих солнечных лучей в полдень для $h_{\odot} = 45$ и 30° . Эти же расстояния были измерены между деревьями в направлении трансект юг—север и восток—запад. Полученные результаты в виде гистограмм распределений расстояний представлены на рис. 36.

Проверка их по χ^2 показала недостоверность различий только между расчетными данными при $h_{\odot} = 45^{\circ}$ и фактическими в направлении юг—север. Так как трансекты юг—север и восток—запад пересекают пробную площадь по диагонали, то при

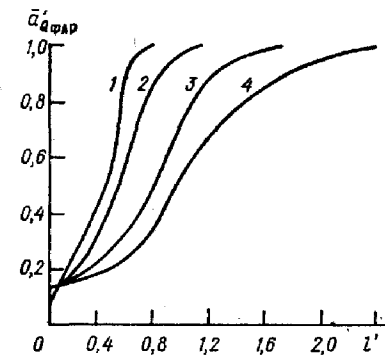


Рис. 35. Ослабление ФАР в области тени на уровне нижней границы кроны елей в зависимости от удаления от кроны.

1) $h_{\odot} \geq 55^{\circ}$, 2) $h_{\odot} = 50 \div 45^{\circ}$, 3) $h_{\odot} = 40 \div 30^{\circ}$, 4) $h_{\odot} = 30 \div 20^{\circ}$. Удаление от кроны дано в относительных единицах, за единицу принята вертикальная протяженность кроны $H_{кр}$.

наличии регулярности, созданной человеком, расстояния в этих направлениях должны быть примерно равными. Однако фактические расстояния между деревьями по направлению восток—запад больше, чем по направлению юг—север. В последнем направлении сильнее выражена и дифференциация деревьев.

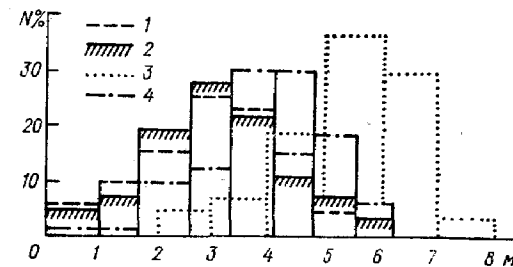


Рис. 36. Распределение расстояний между стволом и кроной соседнего дерева на уровне нижней границы кроны.

В направлении с юга на север: 1) фактические данные, 2) расчетные для $h_{\odot} = 45^{\circ}$, 3) для $h_{\odot} = 30^{\circ}$; 4) в направлении с востока на запад, фактические данные.

Причем увеличение высоты дерева и мощности его кроны происходит только в том случае, когда верхняя половина кроны выходит за пределы тени, создаваемой более развитым соседом с южной стороны. Таким образом, регуляция структуры идет через взаимное затенение наиболее активной части кроны. Последнее подтверждается также несовпадением расчетных расстояний при полуденной $h_{\odot} = 30^{\circ}$ и фактических.

Несомненно, что одного примера мало для того, чтобы принять или опровергнуть гипотезу. Однако (не отрицая возможности формирования любого типа размещения в зависимости от видового состава, возраста, условий произрастания и т. п.) следует признать исходя из фактических материалов, что регу-

Сравнение фактического и расчетного объема конуса кроны ели
($H_{кр} = 4,15$ м, $R_{кр} = 1,45$ м)

Нормированная высота дерева	Объем сечений конуса V м ³		$\frac{V_{ф}}{V_{р}}$
	расчетный	фактический	
0,99—0,95 (низ кроны)	0,92	0,67	0,73
0,95—0,86	2,03	1,83	0,90
0,86—0,81	1,05	0,76	0,73
0,81—0,71	1,59	1,68	1,06
0,71—0,60	1,42	1,32	0,93
0,60—0,54	0,63	0,31	0,50
0,54—0,45	0,63	0,13	0,21
0,45—0,32	0,51	0,08	0,16
0,32—0,15	0,30	0,08	0,27

Как в равнинных, так и в горных лесах наблюдается вытянутость кроны в свободное пространство между особями. Причем в горных лесах максимальный диаметр кроны не обязательно совпадает с продольным профилем склона (табл. 47).

Таблица 47

Распределение азимутов максимальных диаметров проекции кроны
в различных древостоях (%)

Древостой	С—Ю	В—З	СВ—ЮЗ	СЗ—ЮВ	Симметричная крона
Высокосомкнутые березняки, 20—25 лет, С, 20°	22,7	15,3	27,2	24,3	10,5
Среднесомкнутые березняки, 20—25 лет, С, 20°	17,0	12,8	21,3	46,8	2,1
Среднесомкнутые дубравы, 50—70 лет, З, 30°	16,3	20,0	40,0	22,0	1,7
Высокосомкнутые сложные горные ельники, 110—150 лет, С, ССВ, 20°	41,0	27,0	10,2	3,5	8,3
кроны пихты	24,0	22,0	13,0	15,0	26,0
кроны ели	49,0	18,0	15,0	18,0	—
Высоко- и среднесомкнутые чистые равнинные ельники, 80—100 лет	39,6	14,2	17,2	10,5	18,5

Так, например, нельзя интерпретировать преобладание направления юг—север в кронах ельников, расположенных на северных склонах, как специфичную черту строения полога горных лесов, ибо в обследованных равнинных ельниках также велика вероятность подобного направления максимального

лярный тип есть одна из адаптационных форм организации естественных сообществ. Причем формирование упорядоченной структуры в условиях, когда ослаблена корневая конкуренция за водно-минеральные ресурсы, осуществляется через минимизацию взаимного затенения особей. Этот вывод может быть справедлив как для равнинных, так и горных лесов, произрастающих в оптимальных условиях тепло- и влажорегима.

III. СТРУКТУРА ПОЛОГА КРОН И ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА

III.1. Сомкнутость полога и кроны

Прежде чем перейти к анализу данных о прозрачности полога, рассмотрим некоторые особенности заполнения объема РП кронами. При фиксированной густоте и типе размещения плотности заполнения объема РП определяется формой и размерами кроны, которые в свою очередь обусловлены видовыми особенностями растений, стадией онтогенеза и условиями произрастания [10, 197, 219, 221, 225, 226 и др.]. В зависимости от формы и размера кроны изменяется объем их возможного совместного пространства (перекрытий) в ценозе.

Вывод о том, что «общим законом строения фитоценозов и их структурных частей» является сокращение толщины полога по мере увеличения его сомкнутости [10, с. 81], справедлив только для относительно простых по видовому составу РП. Наглядным примером исключения из этого общего правила (помимо тропического дождевого леса) служат дальневосточные горные широколиственно-кедровые и елово-кедровые леса: для них типична высокая плотность на протяжении всей толщи фитоценоза, в результате которой часто невозможно выделить границы ярусов и подъярусов. Даже в относительно простых по своему строению РП расчет объема перекрытий затруднен из-за того, что форма реальных растений по целому ряду причин не соответствует геометрическим фигурам, с помощью которых моделируется крона [114, 136, 219, 221 и др.]. Так, по нашим данным, даже при наличии четко оформленной кроны ели фактический объем кроны для деревьев различного возраста составляет 0,70—0,80 расчетного (табл. 46). Для лиственных пород (например, березы), кроны которых обычно моделируются сферой или эллипсоидом вращения [114, 133], расхождение между $V_{ф}$ и $V_{р}$ составляют 25—40%. Эти соотношения приведены для деревьев открытых местообитаний и господствующего яруса. Под пологом в теневых участках у лиственных пород часто формируются плоские кроны зонтичного типа, а у хвойных — кроны, которые можно моделировать комбинацией конусов и цилиндров, и т. п.

диаметра кроны. Чаще всего вытягивание крон вдоль склона, связанное с изгибом ствола, встречается у лиственных пород, как пород с более гибкой древесиной.

На отдельных участках конкретных северных склонов отмечался сильный наклон стволов берез вниз по склону, образовавшийся после обильных устойчивых снегопадов при сильном ветре. Однако в целом для мелколиственных древостоев преобладают направления, не совпадающие с ориентацией склона (табл. 47). Очевидно, эффект взаимного затенения является более общей причиной, обуславливающей формирование азимутальной неоднородности в конфигурации проекций крон в древостоях различных местообитаний, по сравнению с механическими причинами (типа обхлестывания веток, воздействия силы тяготения, влияния осадков, ветра и т. п.).

В силу сложности расчета объема перекрытий при анализе плотности полога обычно используют две характеристики: сомкнутость полога $C_{\text{п}}$ и сомкнутость крон $C_{\text{кр}}$. Первая из них определяется как отношение площади проекций крон (без учета их перекрытий), вторая — как отношение общей площади проекций крон к площади, занятой

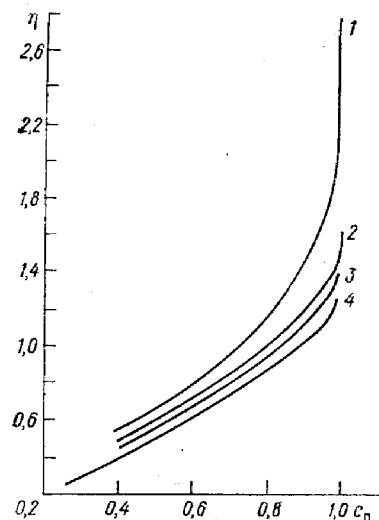


Рис. 37. Соотношение между сомкнутостью полога $C_{\text{п}}$ древесного яруса и индексом перекрытия η .

Пробные площади еловых лесов (см. табл. 32): 1) 20, 2) 19, 3) 13 и 15; березовых лесов: 4) 5, 6, 8.

РП. Величина $C_{\text{п}}$ не превышает 1 (или 100%), $C_{\text{кр}}$ может быть больше 1. Понятие «сомкнутость крон» аналогично понятию «индекс перекрытия» η , введенному Ю. К. Россом [136] для описания плотности горизонтально неоднородного РП.

Соотношение между $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{кр}}$ (или η) иллюстрирует рис. 37, из которого видно, что, во-первых, в мелколиственных лесах при равной $C_{\text{п}}$ наблюдается меньшее перекрытие крон, чем в пихтово-еловых; во-вторых, в горных ельниках, расположенных на склонах одной экспозиции и крутизны, при равной $C_{\text{п}}$ величина η больше в том случае, когда наблюдается случайный тип размещения деревьев (пр. пл. 20); в-третьих, между спелыми древостоями равнинных и горных ельников (пр. пл. 13, 15, 19) при регулярном типе размещения не существует достоверных различий в соотношении величин $C_{\text{п}}$ и η . Полученные результаты подтверждают теоретические выводы о возможных изменениях

η в зависимости от типа размещения. Кроме того, они подтверждают и выводы, сделанные в п. II. 2, об отсутствии принципиальных различий в структуре равнинных и горных лесов, приуроченных не к экстремальным местообитаниям. Отсюда следует, что характер заполнения объема кронового пространства определяется прежде всего светолюбием вида, а при постоянстве этой величины — типом размещения.

Возможные изменения плотности кронового пространства в зависимости от светолюбия эдифицирующих пород характеризует критерий В. В. Плотникова [123]. Так, например, среднее значение класса плотности в дубравах (пр. пл. 1—4) около 3,0—3,5, причём для господствующих по высоте деревьев это значение уменьшается до 1,2—2,0 (т. е. в окружности с радиусом, соответствующим среднему радиусу основания кроны на пробной площади, совместно может произрастать в среднем 1,2—2,0 особи господствующего яруса). Аналогичные величины в березняках (пр. пл. 5—8) изменяются в пределах 1,7—2,1 и 1,3—1,6, а в ореховых лесах средний класс плотности для всего древостоя колеблется от 1,6 до 2,0. Эти данные подтверждают известный факт увеличения требований к снижению плотности у менее теневыносливых видов (так же как у особей одного вида, но разного возраста или различных ярусов).

Если в целом для различных древостоев могут наблюдаться значения $\eta > 1$, то в пределах одного яруса вероятность перекрытия крон очень мала, особенно при наличии регулярного типа размещения (табл. 48). Наиболее плотные участки полога,

Таблица 48

Распределения величин η в пределах отдельных ярусов древостоя при регулярном типе размещения (%)

Ярус древостоя	η		
	0,0	0,1—0,5	0,6—1,0
Березовый лес, пробная площадь 4			
Господствующий	16,0	19,0	65,0
Подчиненный	47,0	28,0	25,0
Еловый лес, пробная площадь 19			
Господствующий			
общий	—	47,0	53,0
ель	10,0	67,0	23,0
пихта	23,0	70,0	7,0
Подчиненный			
общий	26,0	69,0	5,0
ель	42,0	57,0	1,0
пихта	53,0	47,0	—

занятые двумя или более кронами, формируются в основном за счет перекрытий проекций в различных горизонтальных сечениях РП или перекрытий проекций крон деревьев разных видов. В целом положение «чем больше η господствующего яруса, тем ниже η подчиненных ярусов» (табл. 49) сохраняется во всех

Таблица 49

Зависимость между сомкнутостью крон I и II пологов древостоя в ельнике на пробной площади 18 (размер учетной площадки 25 м²)

η , I полог	η , II полог					P_I
	0,0	0,1—0,3	0,4—0,6	0,7—1,0	>1,0	
0,0	1,00+					0,010
0,1—0,3		0,111	0,222	0,444+	0,223+	0,094
0,4—0,6	0,030	0,061	0,121	0,485+	0,303+	0,344
0,7—1,0		0,163+	0,395+	0,372	0,070	0,448
>1,0	0,100+	0,300+	0,400+	0,200		0,104
P_{II}	0,031	0,136	0,281	0,396	0,156	$N=96$ $K'=0,076$

Примечание. P_I и P_{II} — распределение η соответственно для I и II полог; знаком плюс (+) отмечены наиболее вероятные значения η для II полога при различных значениях η I полога; K' — нормированная мера сопряженности в формуле (36); N — общее число учетных площадок.

типах леса. В пределах одного яруса при наличии нескольких видов также преобладает компенсационный тип отношений (табл. 50).

Таблица 50

Зависимость между сомкнутостью крон деревьев ели и пихты господствующего яруса на пробной площади 19 (размер учетной площадки 25 м²)

η , ель яванская	η , пихта белокорая				P_e
	0,0	0,1—0,3	0,4—0,6	0,7—1,0	
0,0		0,200	0,600+	0,200+	0,100
0,1—0,3	0,114	0,568+	0,318		0,440
0,4—0,6	0,343+	0,629+	0,028		0,350
0,7—1,0	0,545+	0,455			0,110
P_{II}	0,230	0,540	0,210	0,020	$K'=0,124$ $N=100$

Примечание. P_{II} — распределение η для пихты, P_e — то же для ели; остальные обозначения см. табл. 49.

Интересно отметить, что регулярность в рисунке размещения стволов сохраняется и при анализе пространственной структуры плотности полога. Об этом свидетельствует характер изменения мер сопряженности между значениями η на участках при различном их удалении друг от друга. Так, например, на пр. пл. 18 и 19 величина K' для господствующего яруса изменяется следующим образом:

$s \times 25 \text{ м}^2$	1	2	3	4
$K'(19)$	0,028	0,059	0,039	0,068
$K'(18)$	0,018	0,013	0,012	0,021

Видно, что при случайном типе размещения значения K' ниже, чем при регулярном. Снижение K' в целом на пр. пл. 19 обусловлено увеличением относительной устойчивости, сложившейся на определенной площади сомкнутости крон, к воздействию плотности полога со стороны окружающих участков. Причем закономерности в изменении K' связаны с размерами жизненного пространства (например, на пр. пл. 19 η на единичной площадке зависит от сомкнутости крон на участках, имеющих радиус, кратный 10—11 м). Но при общем случайном характере изменения η всего яруса на пр. пл. 18 наблюдается увеличение зависимости между сомкнутостью крон хвойных и лиственных пород I и II полог:

$s \times 25 \text{ м}^2$	0	1	2	3
K'	0,036	0,058	0,047	0,029

На рис. 38 показано изменение относительной площади различного типа структур в пологе древостоев. Для обозначения этих типов использованы индексы, предложенные в [136]: ω_0 — площадь, не занятая кронами, ω_1 — площадь, занятая одной кроной, и ω_2 — площадь, занятая несколькими кронами,

$$\omega_0 + \omega_1 + \omega_2 = 1. \quad (38)$$

Независимо от видового состава древесного яруса при $\eta > 1$ резко возрастает площадь ω_2 . Но при равных значениях η ω_2 в пихтово-еловых и широколиственно-кедровых древостоях более чем в 2 раза превышает ω_2 для дубрав и березняков. При этом структура ω_2 наиболее сложная в широколиственно-кедровых древостоях. В пологе этих древостоев с вероятностью 15% встречаются трех- и четырехкратные перекрытия, в мелколиственных древостоях вероятность трехкратных перекрытий практически равна нулю [56]. Исключение составляет высокое значение ω_2 при $\eta=2,8$ для полога березняка, где имеется хорошо развитый хвойный подрост, по высоте входящий в древесный ярус.

Значение ω_1 достигает максимальной величины в мелколиственных древостоях при $\eta=0,9\div 1,3$, в пихтово-еловых ω_1 доминирует при $\eta\approx 1,0$, в широколиственно-кедровых и дубовых — при $\eta=0,6\div 1,4$. В мелколиственных лесах при $\eta < 0,9$ ω_1 соче-

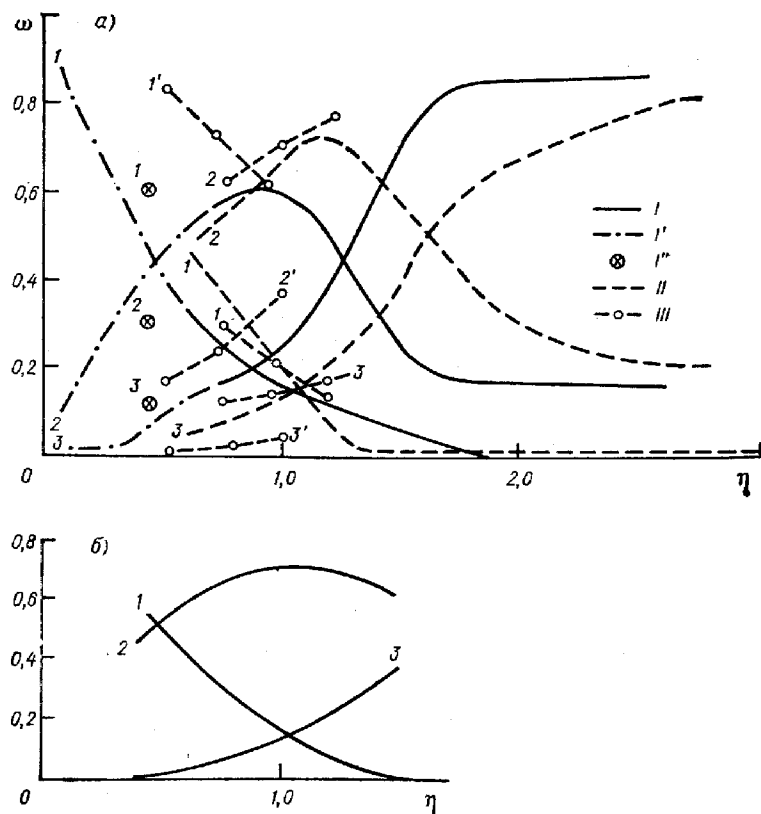


Рис. 38. Изменение функций ω_0 , ω_1 , ω_2 в зависимости от индекса перекрытия η в горных (а) и равнинных (б) лесах.

1) еловые леса, II) мелколиственные, III) дубовые, I') еловые из ели Шренка (Тянь-Шань), случайный тип размещения, I'') групповой; 1) ω_0 , 2) ω_1 , 3) ω_2 . I', 2', 3') то же для первого яруса древостоя.

тается в основном с областью ω_0 , при $\eta > 1,6$ доминируют площади, занятые двумя кронами.

В равнинных чистых ельниках умеренной зоны характер изменения ω_0 и ω_1 в зависимости от η (при $\eta \leq 1,2$) подобен таковому в горных пихтово-еловых лесах (рис. 38 б). Однако в последних за счет большего участия содоминирующих пород возрастает доля ω_2 (за исключением пр. пл. 19, где ω_2 не превышает 0,15 при $\eta = 1,0$).

В пределах полога древесного яруса происходит изменение соотношения площадей ω_0 , ω_1 и ω_2 в различных горизонтальных сечениях (табл. 51).

Таблица 51

Изменение ω_0 , ω_1 и ω_2 в пологе березовых лесов

№ пробной площади	Ярус древостоя	η	ω_0	ω_1	ω_2
5	Общий	1,68	0,0	0,67	0,33
	Господствующий	0,93	0,20	0,68	0,12
6	Общий	1,32	0,0	0,71	0,29
	Господствующий	0,87	0,21	0,70	0,09
8	Общий	1,10	0,13	0,66	0,21
	Господствующий	0,75	0,31	0,60	0,09

Рассмотренные выше эмпирические функции ω_0 , ω_1 и ω_2 в зависимости от η в общем соответствуют теоретическим функциям, полученным в предположении регулярного и случайного типов размещения растений с цилиндрическими кронами [136]. Причем на пробных площадях, где был установлен регулярный тип размещения, величина ω_0 наиболее резко приближается к нулю при η около 1. Но, в отличие от теоретических функций, значение ω_2 выше для тех древостоев, для которых был выявлен случайный тип размещения. Это расхождение можно объяснить конкретной структурой рассмотренных типов леса, а именно сложным видовым составом древесного яруса и высокой плотностью на протяжении всей толщи РП.

Так как ω_0 преобладает только при $\eta < 0,5-0,6$ в реальных РП под пологом древесного яруса, следует ожидать формирования радиационного поля преимущественно за счет потоков радиации, поступившей через внутрикрупные просветы как в области ω_1 , так и ω_2 . В интервале $0,8 \leq \eta \leq 1,7$ радиационное поле формируется за счет ослабления и пропуска радиации через все выделенные типы структур полога.

Таким образом, приведенные здесь данные свидетельствуют об отсутствии принципиальных различий в характере заполнения кронного пространства между равнинными и горными лесами. Основными факторами (в оптимальных для произрастания леса условиях), определяющими плотность кронного пространства, являются светолюбие породы и тип пространственного размещения. Упорядоченность структуры, выявленная на основе анализа размещения стволов в монодоминантных древостоях или отдельных ярусов, сохраняется при рассмотрении пространственного изменения сомкнутости крон.

III.3.2. Ажурность крон и полога древесного яруса

В предыдущих разделах кроны рассматривались как непрозрачные среды, поэтому характер распределения просветов и их размеры определялись только через ω_0 . Ажурность полога и крон устанавливалась на основе полусферических фотографий

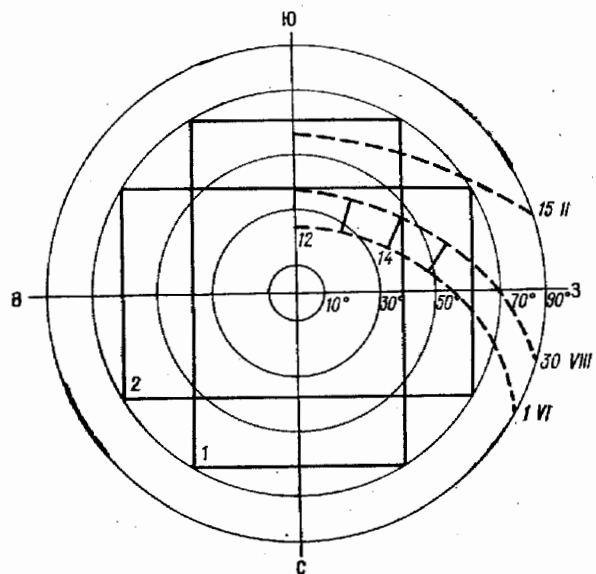


Рис. 39. Сравнение палеток для обработки полусферических фотографий, сделанных объективом "Fish-eye" с углом зрения 180 и 130°.

Контуры 1 и 2 соответствуют двум различным положениям палетки для 130°. Сплошные линии — альмукантарате (ϕ_i), прерывистые — координатная сетка для определения просветов вдоль линии хода Солнца за 1 июня, 30 августа и 15 февраля.

(ПСФ), сделанных на тех же пробных площадках (см. табл. 32). При этом использовалась общепринятая методика определения относительной доли просветов с применением палеток (рис. 39) с полярной системой координат, где ϕ_i — зенитный угол или полярный радиус, ϕ_i — азимут или полярный угол, отсчитываемый по часовой стрелке от севера [113, 181, 185, 189, 199, 251].

Для определения ажурности крон (т. е. доли просветов в области ω_1) Ю. Л. Цельникер ввела коэффициент ажурности крон $a_{кр}$ [163]. Величина $a_{кр}$ соответствует доле просветов в пологе одновидового древостоя при $C_{\pi}=1$. Так как оценки $a_{кр}$ в [163] получены с помощью широкоугольных фотографий (аппарат «Зенит» с объективом «Мир-1»), сделанных вверх, то они, по

сути, отражают вертикальную сквозистость (или проективное покрытие) сомкнутого полога. Зона, охватываемая объективом «Мир-1», примерно соответствует зоне с $\phi_i=30^\circ$ на ПСФ. Поэтому для сопоставления литературных и наших данных величина $a_{кр}$ на ПСФ определялась как доля просветов в зоне, ограниченной $\phi_i=30^\circ$. Этот прием не устраняет возможных расхождений в оценках как из-за различной разрешающей способности объектива, так и из-за различной глубины полога или высоты, с которой проводилось фотографирование. Например, для осины (*Populus tremula*) $a_{кр}$, полученное на основе обработки фотографий, сделанных широкоугольным объективом, равно 0,46; а на основе ПСФ 130° — 0,27 (табл. 52). Влияние глубины по-

Таблица 52

Коэффициент ажурности крон различных древесных пород

Порода	Возраст	$a_{кр}$	Порода	Возраст	$a_{кр}$
«Мир-1», угол зрения 76° [163, 164]			«Fish-eye», угол зрения 180°		
Сосна обыкновенная	25—35	0,25	Ель аянская	100—150	0,08
	70—100	0,32	Пихта белокорая	80—100	0,03
Ель обыкновенная	70—100	0,05	Береза маньчжурская	20—25	0,29
Береза повислая	25—35	0,38	Дуб монгольский	50—80	0,17—0,21
Осина	70—100	0,48	Осина	35	0,27
Дуб черешчатый	25—35	0,46	«Fish-eye», угол зрения 130°		
	25—35	0,11	Ель аянская	100—150	0,10
	70—100	0,13	Пихта белокорая	80—100	0,04
Липа мелколистная		0,07	Береза маньчжурская	20—25	0,34
Клен остролистный	25—35	0,07	Дуб монгольский	50—80	0,20—0,26
	70—100	0,07			
Порода		$a_{кр}$	Порода		$a_{кр}$

Субтропические и тропические леса

Казуарина	0,44	Жестколистные виды	0,25—0,35
Сосна карибская	0,41	Бук южный	0,18
Араукария (нонфоркская сосна)	0,22—0,46	Пальмы (тропические подвиды)	0,09—0,03
Пальма кокосовая	0,22		

лога сказывается на величинах $a_{кр}$, полученных для дуба монгольского в прибрежных и континентальных дубравах (в последних $a_{кр}$ меньше) и т. п.

Но в целом данные табл. 52 свидетельствуют о существенных различиях в ажурности крон светолюбивых и теневыносли-

вых пород, которые сохраняются при сравнении растительности разных зон [40]. Для жизненной формы $a_{кр}$ является достаточно устойчивой характеристикой (с учетом указанных выше возможных расхождений), поэтому априори при равной сомкнутости и толщине полога РП можно ожидать, что значения пропускания радиации в различных местообитаниях будут близки.

Для расчета ажурности полога $a_{п}$ Ю. Л. Цельникер [163] предложила формулу

$$a_{п} = (1 - C_{п} + a_{кр} C_{п}) \cdot 100 \%, \quad (39)$$

где $(1 - C_{п})$ — относительная площадь межкрупных просветов ω_0 , $a_{кр} C_{п}$ — относительная площадь внутрикрупных просветов.

Однако эта формула не совсем справедлива, так как, во-первых, вертикальная сквозистость не отражает долю просветов во всем пологе и, во-вторых, в ней не учтены возможные перекрытия крон при $C_{п} \leq 1$. На основе первой причины можно предполагать занижение оценок $a_{п}$ по (39) по сравнению с фактическими данными, а на основе второй — их завышение.

Результаты измерений показывают (рис. 40), что сосредоточение просветов в верхней части полусферы является характерной чертой структуры полога при преобладании теневыносливых видов. Для мелколиственных горных и равнинных лесов более типично равномерное распределение просветов с некоторым максимумом в зоне $\theta_i = 20-50^\circ$. Такое же равномерное распределение по полусфере, но при более низких значениях $a_{п}$, наблюдается в эволюционно зрелых сообществах, сформированных совокупностью видов с различной степенью светолюбия и теневыносливости (влажнотропические ВТ и тропические леса). Но не бывает правил без исключений. Наглядным примером этих исключений является увеличение ажурности в средних зонах полога, образованных типичными представителями пионерных светолюбивых (казуарина, жестколистные леса) и теневыносливых видов зрелых сообществ (различные виды пальм), а также выделение двух зон с максимумами прозрачности в пологе некоторых дубовых горных лесов Приморского края. Эти исключения связаны со структурой конкретных сообществ, а именно, с наличием вынесенных вверх крон и свободным пространством в зоне стволов.

Для теневыносливых видов связь между $a_{п}$ и $C_{п}$ более тесная, чем для светолюбивых (мера сопряженности¹ K между $a_{п}$ и $C_{п}$ для елово-пихтовых лесов Приморского края равна 0,52; для равнинных ельников умеренной зоны — 0,48; для мелколиственных горных и равнинных лесов — 0,28—0,32 [56, 79]). Снижение сопряженности для древостоев, сформированных светолюбивыми видами, обусловлено рыхлой структурой кроны и характером распределения просветов в толще РП, в результате чего увеличение $C_{п}$ не обязательно влечет за собой уменьшение $a_{п}$.

¹ $K = T(A, B) / H(A)$, см. формулу (36) и [130].

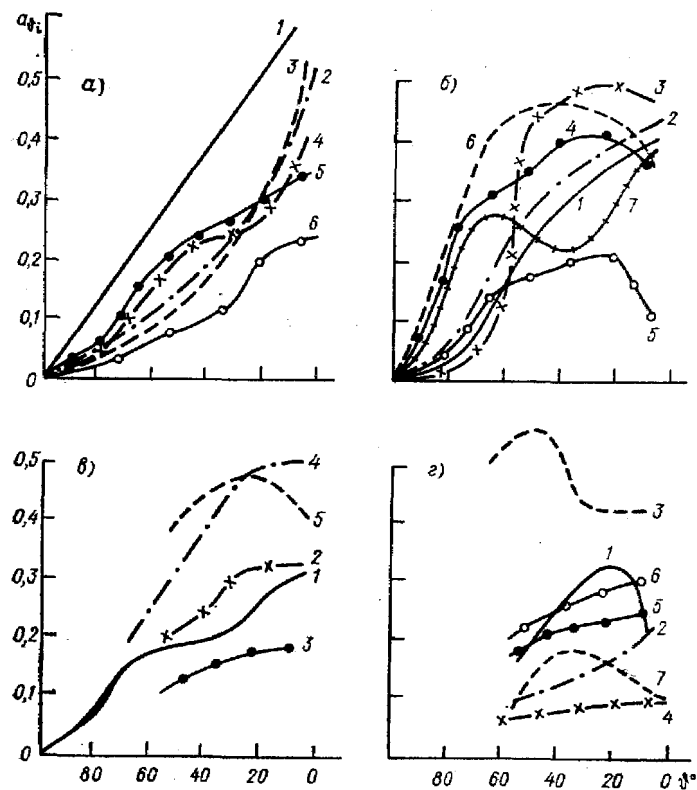


Рис. 40. Ажурность полога равнинных и горных древостоев.

а — с господством *Picea* и *Abies*: 1—4) равнинные леса, 5—6) горные на северных склонах 20° : 1) $C_{п} = 0,5$, 2, 3) $C_{п} = 0,7 \pm 0,8$ [10], 4) $C_{п} = 0,7$, 5) $C_{п} = 0,7$, 6) $C_{п} = 0,8 \pm 0,9$;

б — с господством *Betula* (1, 4—6), *Populus* (2—3) и *Quercus* (7): 1—3) равнинные леса, 4—7) горные: 1) $C_{п} = 0,95$, 2) $C_{п} = 0,8$ [10], 3) $C_{п} = 0,7$, 4—5) северные склоны $16-20^\circ$, 6—7) западные склоны 30° , 4) $C_{п} = 0,7$, 5) $C_{п} = 0,9$, 6) $C_{п} = 0,7 \pm 0,6$, 7) $C_{п} = 0,6 \pm 0,5$;

в — с господством *Pinus*: 1 — сосняк равнинный, $C_{п} = 0,7$ [10], 2—5) ПСФ = 130° , 2 — кедровник на южном склоне 20° , $C_{п} = 0,8 \pm 0,9$, 3) кедровник на северном склоне 20° , $C_{п} = 0,6 \pm 0,7$, 4) полог сосны карибской, 5) полог сосны норфолкской (4, 5 — субтропический лес на островах юго-западной части Тихого океана);

г — полог субтропического (СТ) и тропического (Т) лесов на островах юго-западной части Тихого океана, ПСФ = 130° : 1) СТ жестколиственный лес, 2) СТ, бук южный, западный склон 20° , 3) СТ казуариновый лес, 4) ВТ лес, 5) СТ лес, 6) лес на атоллах, 7) Т лес с господством пальм.

Однозначный характер связи между C_{Π} и a_{Π} типичен для древостоев, в пологе которых преобладают межкрупные просветы. Однако практически во всех древостоях наблюдается тенденция к увеличению a_{Π} по мере снижения C_{Π} (рис. 41). При этом фактическая величина a_{Π} выше расчетной по формуле (39). Из сопоставления этих данных с приведенными на рис. 37 и 38 очевидно, что при $C_{\Pi} < 0,8$ расхождения обусловлены разницей

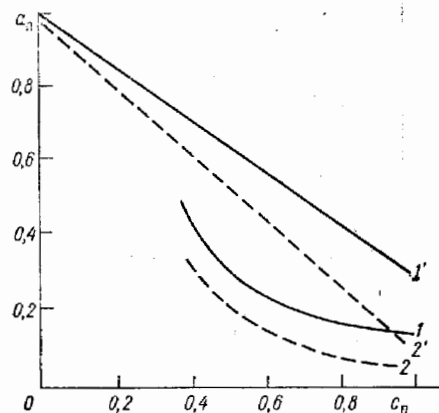


Рис. 41. Зависимость между сомкнутостью и ажурностью полого в горных мелколиственных лесах (1) и пихтово-еловых (2).

1' и 2' — рассчитанные по формуле (39) значения a_{Π} для тех же лесов.

лесов? В. А. Алексеев [10] приводит материалы, указывающие на определенные закономерности в распределении просветов вдоль и поперек склона, связанные с асимметрией крон и изменением толщины полого. Так, при продольном профиле на юго-западном склоне им было зафиксировано снижение ажурности вверх по склону и увеличение ее вниз по склону. Для последнего направления a_{Π} в целом было выше, чем для поперечного разреза, и только при углах $10-20^{\circ}$ ниже горизонта $a_{\Pi} \rightarrow 0$. В действительности распределение просветов в пологе горных лесов представляет собой более сложную картину.

Из рис. 42 видно, что при параллельном визировании по продольному профилю склона наблюдается перераспределение просветов по зонам полусферы, но средняя величина a_{Π} за счет вклада области вниз по склону увеличивается лишь на несколько процентов (менее $10-15\%$ на крутых склонах). На примере западного склона показан совершенно обратный отмеченному в [10] характер изменения ажурности полого по продольному и поперечному профилям. Как на северном, так и западном склонах в сравниваемых лиственных древостоях зоны

с максимальной ажурностью преимущественно смещены в сторону юга [56]. Аналогичное азимутальное распределение просветов наблюдается и в равнинном осиннике (табл. 53). В то же время в пологе елово-пихтового древостоя на северном склоне наиболее светлые участки сосредоточены в северном секторе полусферы (табл. 54).

Чем равномернее и плотнее заполнен полог, тем в меньшей степени проявляется азимутальная неоднородность в распределении просветов. Но при этом сохраняется смещение по азимуту от зоны к зоне участков с наибольшим количеством просветов

с максимальной ажурностью преимущественно смещены в сторону юга [56]. Аналогичное азимутальное распределение просветов наблюдается и в равнинном осиннике (табл. 53). В то же время в пологе елово-пихтового древостоя на северном склоне наиболее светлые участки сосредоточены в северном секторе полусферы (табл. 54).

Чем равномернее и плотнее заполнен полог, тем в меньшей степени проявляется азимутальная неоднородность в распределении просветов. Но при этом сохраняется смещение по азимуту от зоны к зоне участков с наибольшим количеством просветов

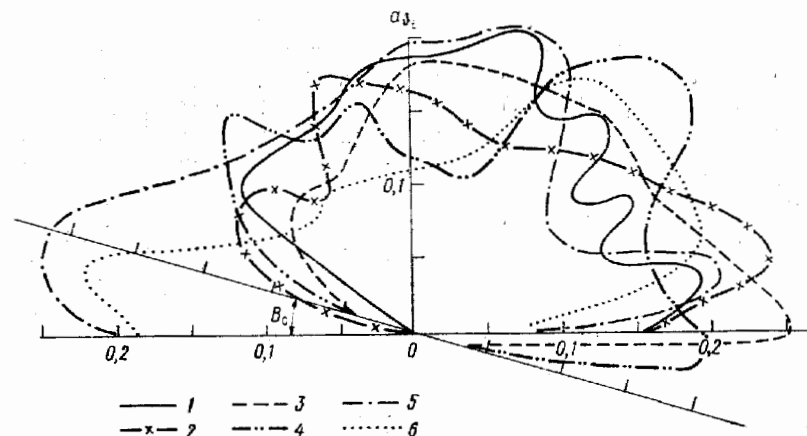


Рис. 42. Распределение доли просветов в пологе мелколиственных древостоев (в % от суммы просветов в зоне 10°) по профилю вдоль северного склона 18° при горизонтальной (1, 2) и параллельной склону (3, 4) съемке, по разрезу вдоль (5) и поперек (6) западного склона 30° .

1, 3) $C_{\Pi} = 0,7 \div 0,8$, 2, 4) $C_{\Pi} = 0,8$, 5, 6) $C_{\Pi} = 0,6 \div 0,7$.

Таблица 53

Распределение просветов в зоне $\phi_i = 0 \div 30^{\circ}$ полого мелколиственных горных и равнинных лесов

Лес	Азимут сектора полусферы	Просветы, баллы						a_{Π}
		0	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	
Осиновый (равнина, возраст 35-40 лет, $C_{\Pi} = 0,6 \div 0,7$)	С, СВ, СЗ	0,224	0,348	0,188	0,107	0,107	0,036	0,29
	Ю, ЮВ, ЮЗ	0,186	0,093	0,189	0,143	0,239	0,150	0,48
Березовый (склон 20° , возраст 25 лет, $C_{\Pi} = 0,7$)	С, СВ, СЗ	0,593	0,222	0,074	0,074	0,037	—	0,12
	Ю, ЮВ, ЮЗ	0,222	0,037	0,074	0,148	0,111	0,407	0,58

(табл. 54). Именно за счет внутренней взаимной упорядоченности самих крон достигается максимально возможное в конкретных условиях произрастания (при определенном видовом составе) заполнение кронового пространства фитоэлементами.

Таблица 54

Зональное распределение относительной площади просветов (% от суммы просветов в зоне). Северный склон крутизной 15–20°, березняк (Б), елово-пихтовый лес (ЕП), $C_{\Sigma} = 0,8 \div 0,9$

φ_i°	Древостой	Азимут сектора полусферы							
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
80	Б	5	14	19	15	16	13	7	11
	ЕП	9	11	18	13	11	14	10	13
70	Б	10	8	11	14	12	15	12	8
	ЕП	17	9	20	10	8	12	11	14
60	Б	12	13	10	12	12	15	16	10
	ЕП	19	11	15	11	13	13	9	10
50	Б	12	15	13	11	10	15	10	12
	ЕП	20	11	7	16	13	11	10	12
40	Б	12	17	11	10	8	14	12	16
	ЕП	13	11	10	17	13	9	14	13
30	Б	12	17	12	11	10	12	15	10
	ЕП	10	12	9	17	16	10	14	12
20	Б	8	14	14	12	14	13	14	11
	ЕП	10	12	8	12	14	13	21	9
10	Б	6	9	9	9	9	11	28	19
	ЕП	15	13	18	14	9	13	9	19
0–90	Б	11	14	12	12	11	14	14	12
	ЕП	15	11	14	13	12	12	11	12

* * *

Таким образом, пространственная структура системы РП является результатом опосредованных через фитоценоотические отношения воздействий факторов среды. По мере развития сукцессий [153] в онтогенезе каждого конкретного сообщества проявляется тенденция к формированию в целом случайного типа пространственной структуры при максимально возможном заполнении кронового пространства. В силу общности этой тенденции между структурой равнинных и горных лесов, произрастающих в условиях оптимального тепло- и влагорежима, не существует принципиальных различий. Влияние рельефа в этих условиях проявляется не столько в прямом воздействии на закономерности формирования структуры, сколько косвенно через изменение видового состава, который в свою очередь и определяет основные черты структуры полога РП в конкретных условиях произрастания.

Глава III

ОСЛАБЛЕНИЕ РАДИАЦИИ ПОЛОГОМ ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА ГОРНЫХ ЛЕСОВ

III.1. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ФИТОАКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГОРНЫХ ЛЕСАХ

Измерения радиации в РП независимо от того, к каким формам рельефа он приурочен, должны обеспечить информацию о пространственно-временной структуре радиационного поля во всем объеме РП и средних характеристиках рассеивания (пропускания и отражения) и поглощения радиации как отдельными слоями, так и всем ценозом в целом. Методики соответствующих измерений в равнинных ценозах достаточно хорошо разработаны и освещены в литературе [10, 33–35, 49, 133, 137, 155, 163 и др.]. Сохраняющаяся в литературе информация о горных лесах [7, 10, 46, 82, 100, 101, 142, 143, 170, 171, 231, 232, 282] из-за различий в методике наблюдений дает представление только о характеристиках радиационных условий для конкретных ценозов, где проводились исследования. Поэтому опубликованные к настоящему времени данные о горных лесах нельзя использовать для сравнения радиационного режима равнинных и горных РП.

Для получения сравнимых результатов при исследованиях в горных районах необходимо выделить из всей совокупности влияние геофизических факторов, погодных условий, рельефа и собственно растительности. В связи с этим целесообразно проводить фитоактинометрические наблюдения, придерживаясь следующих основных положений:

— участки с одним типом растительности должны выбираться на склонах различной экспозиции и крутизны;

— разные растительные объекты по возможности должны быть представлены на склонах одной экспозиции и близких по крутизне;

— оценка влияния высоты Солнца и погодных условий должна проводиться для двух вариантов: 1) разные комбинации рельефа при одном типе РП и 2) разные типы РП при одних формах рельефа.

Таким образом, должны соблюдаться обычные правила при постановке экспериментальных исследований многофакторных

систем. Очевидно, что в горных районах из-за мозаичности распространения растительности трудно подобрать идентичные объекты. При изучении лесных сообществ группировку объектов можно проводить на основе видового состава древесного яруса (с учетом возраста и сомкнутости), так как основные тенденции в ослаблении радиации определяются оптическими свойствами эдифицирующих синузий.

III.1.1. Измерения отраженной радиации

В горных условиях вести непосредственные измерения потоков радиации, отраженной от верхней границы древостоя, технически очень сложно. Сложность состоит в том, что любые измерения с вышек (как это делается при наблюдениях в равнинных лесах) не дают необходимых результатов прежде всего из-за значительной пространственной неоднородности радиационного поля в условиях горного рельефа. Специфика горных условий требует большего осреднения по пространству, чем на равнине.

Вероятно, наиболее оптимальным путем является использование дистанционных (самолетных и т. п.) измерений. Однако для замкнутых долин (особенно низкого порядка) подобные измерения вряд ли можно реализовать. В последнем случае, очевидно, можно использовать приборы, передвигающиеся на тросах, которые протянуты между склонами на различной высоте от дна долины. При этом должна обеспечиваться, во-первых, экранизация датчиков от потоков радиации, отраженной от поверхности других склонов, а также прямой солнечной радиации, и, во-вторых, соответствующая ориентация самих датчиков в плоскости, параллельной склону.

Подобная система, оборудованная автоматической метеостанцией «Троль»¹, смонтирована в долине руч. Волковский на Кавалеровском стационаре Тихоокеанского института географии ДВНЦ АН СССР, где проводятся ее испытания в рабочем режиме. Несмотря на первые результаты измерений отраженной радиации с помощью системы «Троль», вопросы методики систематических и массовых измерений отражения от склонов (особенно облесенных) остаются нерешенными. Поэтому в наших исследованиях для оценки альbedo поверхности склонов были использованы литературные данные для равнинных лесов. Правомочность распространения подобных данных для горных районов, естественно, требует проверки при дальнейших исследованиях. Здесь прежде всего следует учесть изменения видового состава РП, изменения соотношения рассеянной и прямой

¹ Автоматическая подвижная метеостанция спроектирована при нашем участии [50] и выполнена в Белорусском государственном университете по заказу Тихоокеанского института географии ДВНЦ АН СССР.

радиации в общем суммарном потоке. Кроме того, можно полагать, что соотношение угловых характеристик Солнца и склонов должны несколько изменить зависимость отраженной радиации от высоты Солнца. В то же время многократное рассеяние радиации в пределах горных долин (особенно низких порядков) может нивелировать предполагаемые изменения альbedo как функции h_{\odot} .

В принципе для альbedo ФАР возможная ошибка за счет неучета факторов рельефа незначительна, так как величина альbedo ФАР меньше 10% [10, 49, 137, 140 и др.]. Для интегральной коротковолновой радиации аналогичная ошибка может быть больше. Но при непосредственных измерениях отраженной радиации от поверхности верхней границы древостоя ошибки могут быть значительно выше за счет нерепрезентативности площади, которая охватывается измерениями с вышек.

III.1.2. Определение пропускания радиации

В наших исследованиях при измерении ИНТ радиации внутри РП (на различных высотных уровнях) применялись стандартные актинометрические приборы (альбедометр, пиранометр и актинометр Янишевского [178]). Селеновые фотоэлементы Ф-102 (люксметр Ю-16) и фотоэлементы ФЭС-10 без корректирующих фильтров с насадкой Б. И. Гуляева [155] использовались для получения относительных величин освещенности, которые примерно равнозначны коэффициентам пропускания ФАР [9, 10, 155, 162, 163 и др.].

Радиация и освещенность на открытых склонах (равных по экспозиции, крутизне и высоте над уровнем моря тем участкам, где проводились фитоактинометрические наблюдения) измерялась аналогичными приборами. При наличии сетевого питания или аккумуляторов регистрация велась потенциометрами ЭПП-09, КСП-4 или милливольтметром Н-39. В тех случаях, когда невозможно было обеспечить постоянную регистрацию потоков, на открытых участках склона проводились наблюдения, параллельные наблюдениям в лесу. Показания приборов при этом снимались через 10 мин.

При измерениях в РП все отсчеты после введения соответствующих поправок переводились в относительные единицы и находилась функция пропускания a' ($a' = I_i/I$, где I_i — радиация, измеренная в i -й точке РП в конкретное время, I — радиация на открытом месте в то же время).

В соответствии с общими методическими требованиями к фитоактинометрическим исследованиям наблюдения проводились при устойчивых погодных условиях: ясно (\odot^2); малооблачно, общая облачность менее 2 баллов; пасмурно, облачность 8—10 баллов, диск Солнца полностью закрыт облаками (П).

интерпретации актинометрических данных с учетом фитометрии РП (особенно при изучении вертикальных профилей функции пропускания $a_Q(L)$ [82, 125]).

Следует подчеркнуть, что при измерениях суммарной ИНТ радиации в горных РП требования к корректной установке приборов более жесткие, чем при измерениях ФАР. Последнее объясняется более интенсивным ослаблением радиации в области ФАР растительностью.

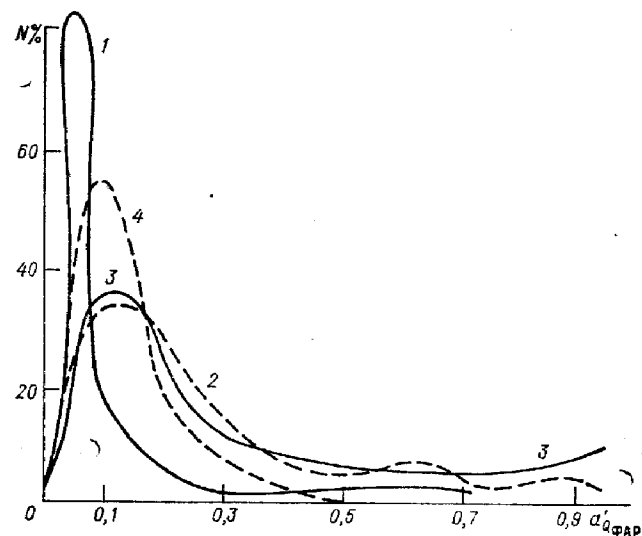


Рис. 44. Распределение суммарной ФАР под пологом горных лесов в ясную погоду при параллельной склону (1, 3) и горизонтальной (2, 4) установке прибора.
1, 2) $\alpha = 30^\circ$, $C_{\text{п}} = 0,5 \pm 0,6$, $h_{\odot} > 63^\circ$; 3, 4) $\alpha = 20^\circ$, $C_{\text{п}} = 0,6 \pm 0,7$, $h_{\odot} = 30^\circ$.

Одним из основных методических требований при проведении фитоактинометрических наблюдений является обеспечение необходимого объема выборки для получения статистически достоверных результатов.

При определении необходимого числа измерений обычно исходят из заданной точности определения средней величины пропускания 10 % и надежности вывода $P = 0,95$. Для горных лесов необходимый объем выборки, так же как и для равнинных лесов, определяется главным образом сомкнутостью полога крон, h_{\odot} и облачностью, т. е. факторами, от которых зависит равномерность распределения радиации по площади [38].

Далее обработка первичных материалов проводится по общей методике, применяемой в математической статистике и тео-

рии вероятности [32, 106]. Можно ограничиться расчетом первых двух моментов — среднего значения \bar{a}' и дисперсии $\sigma_a'^2$, если при этом приводится кривая эмпирического распределения a' . Построение самой кривой необходимо, так как средние величины отражают далеко не полную картину обеспеченности радиацией растений нижних ярусов на исследуемой площади. С помощью частотных характеристик различных условий можно оценить вероятность появления тех или иных интенсивностей радиации и объективно описать пространственную структуру радиационного поля внутри РП.

Оценка значимости различий между \bar{a}' и эмпирическими распределениями a' проводится с целью выявления характерных ситуаций, сравнение которых необходимо для анализа закономерных изменений радиационного поля в зависимости от геофизических факторов, рельефа и структуры РП.

Дальнейший расчет поглощения радиации проводится по неоднократно описанной в литературе методике [10, 33—35, 133, 137, 140, 155, 259, 268 и др.], которая может без дополнительных модификаций использоваться для горных РП, если соблюдены все изложенные выше требования к сбору первичной информации.

III.1.3. Фотографический метод изучения пропускания радиации

Наш опыт работы в горных лесах показал большую трудоемкость фитоактинометрических наблюдений. Передвижение наблюдателей с приборами по склонам, переходы по пересеченной местности между пробными площадями, корректировка положения прибора в каждой точке и т. п. — все это существенно замедляет процесс измерений. Поэтому в горных лесах по сравнению с равнинными для проведения одного и того же объема наблюдений требуется значительно больше времени. Оказалось практически нереальным выполнение полной программы наблюдений в течение одного сезона даже для наиболее типичных в регионе лесных формаций.

Для получения массового материала о функциях пропускания с меньшими затратами труда целесообразно использовать метод полусферических фотографий ПСФ. Обоснование этого метода изложено в работах Андерсон, Эванса, Комба, Т. А. Нильсона, Ю. К. Росса и др. [113, 137, 180, 181, 199, 204, 251]. Метод ПСФ позволяет получить функции пропускания прямой a_s и рассеянной (a_D) радиации неба, на основе данных о распределении просветов в пологе РП.

Возможность применения характеристик просветов для оценки базируется на предположении, что прямая радиация поступает внутрь РП только через просветы в направлении из

в темнохвойных лесах (а именно, преобладание ω_0^1) способствует формированию под их пологом редких, но устойчивых локальных пятен с прямой радиацией в течение 20—50 мин на общем низком фоне пропускания.

В реальных ситуациях вид функции $a_s = f(h_\odot)$ может существенно отличаться от гипотетических представлений. Различия в этом случае будут связаны с влиянием структуры РП: видовым составом древесного яруса, размещением и размерами просветов, фитомассой, пространственной ориентацией фитоэлементов, характером их упаковки и т. п. [114, 136, 180, 194, 213, 233—235, 238, 254, 284, 290]. Воздействие горных РП на зависимость $a_s = f(h_\odot)$ иллюстрируют данные, приведенные на рис. 46.

В среднем для всех рассмотренных вариантов горных лесов, произрастающих на среднекрутых склонах различной экспозиции, наблюдается увеличение a_s по мере возрастания h_\odot . Однако возможны и отклонения от этой общей тенденции. Так, максимум для березовых лесов северного склона отмечается при h_\odot около 50° (кривая 29 на рис. 46 а), а для западного — при $h_\odot = 20 \div 25^\circ$ (кривая 34). В то же время из характера изменения $\cos B_c / \cos \alpha$ следует ожидать увеличения a_s на северном склоне по мере возрастания h_\odot . Аналогично на западном склоне 30° положение возможного максимума a_s соответствует $h_\odot = 40 \div 60^\circ$ после полудня. Указанные отклонения обусловлены только спецификой расположения просветов в пологе конкретных древостоев, так как закрытость горизонта рельефом не перекрывает линии хода Солнца при h_\odot , для которых отмечается снижение a_s .

Рисунок 46 б показывает, что ошибочные выводы при трактовке закономерностей радиационного режима горных лесов можно получить, если при анализе не расчленять собственно влияние РП и влияние закрытости горизонта рельефа в месте исследований.

Непосредственно влияние структуры полога верхних ярусов особенно явно прослеживается при сравнении дневной динамики в мелколиственных и широколиственных лесах на западном склоне при близких диаграммах закрытости горизонта (рис. 46 б). Под пологом этих лесов наблюдается различное соотношение между дополуденными и послеполуденными значениями a_s : только под пологом березового древостоя динамика a_s соответствует теоретическим представлениям для западных склонов. Делать вывод о том, случайна ли эта ситуация или закономерна (в плане отражения адаптации различных по светлюбости пород к условиям прихода радиации), из-за недостаточности материалов пока преждевременно.

¹ При низкой вероятности появления просветов вообще.

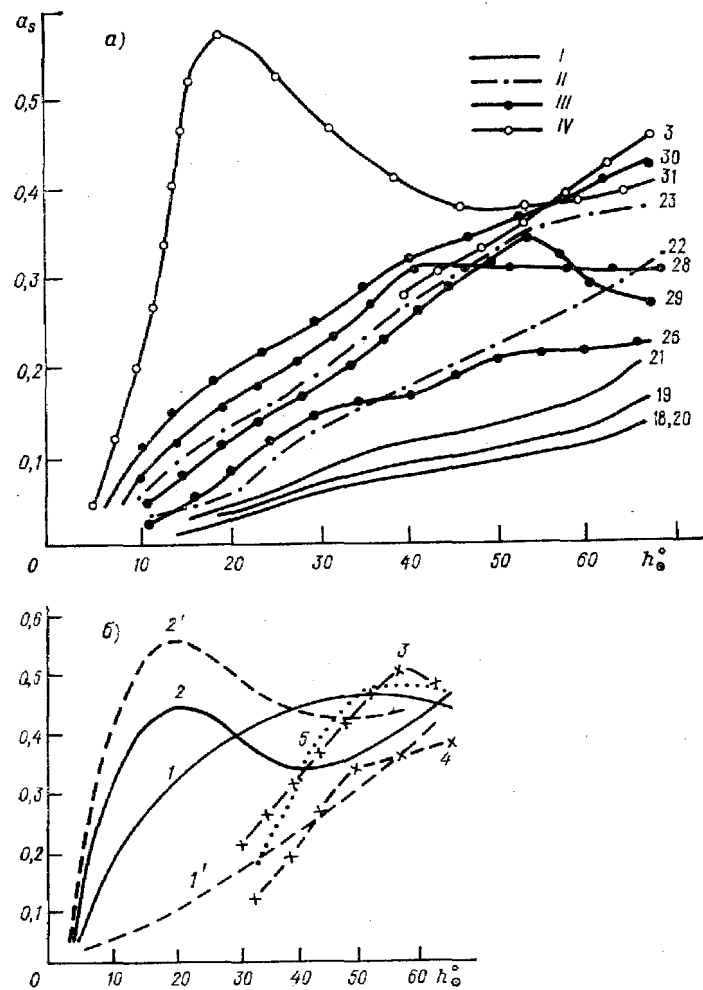


Рис. 46. Изменение пропускания прямой радиации в горных лесах при ясной погоде в зависимости от h_\odot .

а: I) пихтово-еловые леса, II) широколиственно-кедровые, III) мелколиственные, IV) дубовые; цифры у кривых — номера пробных площадей (см. табл. 32 и 58);

б — западный склон 30° : 1, 1') березовый лес, $C_{\text{п}} = 0,6$, 2, 2') дубовый лес, $C_{\text{п}} = 0,5$, 1, 2) до полудня, 1', 2') после полудня; восточный склон 10° , дубовый лес, $C_{\text{п}} = 0,6 \div 0,7$: 3) до полудня, 4) после полудня, 5) после полудня с учетом закрытости горизонта рельефом.

В целом данные рис. 46 свидетельствуют в пользу того, что при одном видовом составе древесного яруса a_s определяется в большей степени структурой полога, чем характеристиками рельефа.

На основании значений a_s за день при осреднении данных ПСФ по площади была получена зависимость a_s от C_{Π} . Обработка материала для выявления этой зависимости проводилась с привлечением информационного анализа, и вид функции $a_s = f(C_{\Pi})$ был определен на основе распределения коэффициентов направления связи [96, 128—130]. При этом объединялись данные об a_s , полученные для различных склонов, так как выше была продемонстрирована преобладающая роль структуры РП в определении тенденций пропускания прямой радиации.

Недостатки C_{Π} как показателя структуры РП и ограниченность его применения при анализе радиационного режима неоднократно обсуждались в литературе [10, 47 и др.]. Но так как сомкнутость широко используется в геоботанических описаниях (практически это единственная количественная характеристика структуры древостоя, по которой имеется массовая информация), то для решения задач, не требующих высокой точности, вполне можно использовать этот показатель при сравнении энергетики различных сообществ. Тем более, что для определенного видового состава древостоя существует достаточно тесная зависимость между C_{Π} и a_{Π} .

Как следует из рис. 47, в исследованных горных древостоях ослабление прямой радиации происходит по закону, близкому к экспоненциальному. Этот тип зависимости вообще характерен для убывания нисходящих потоков в РП по мере увеличения плотности фитомассы [2, 10, 33—35, 44—45, 55, 59, 82, 114, 115, 133, 137, 158, 164, 165, 192, 212, 213, 223, 228, 233, 235, 239, 243, 253, 278, 289, 294, 296, 297].

Эмпирическая функция $\bar{a}_s = f(C_{\Pi})$ удовлетворительно аппроксимируется выражением

$$\bar{a}_s = e^{-bC_{\Pi}}, \quad (44)$$

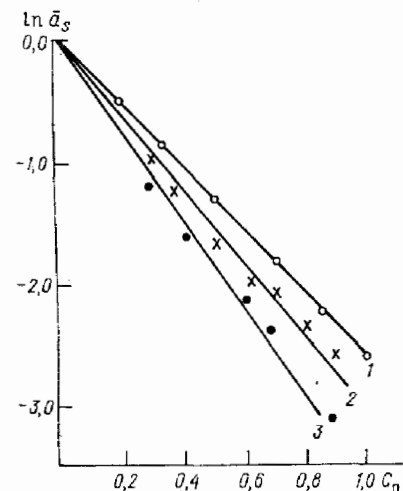


Рис. 47. Изменение \bar{a}_s за вегетационный период в зависимости от сомкнутости полога при доминировании *Betula mandshurica*, *Populus davidiana* (1), *Quercus mongolica* (2), *Picea ajanensis* и *Abies nephrolepis* (3).

Рис. 48. Изменение рассчитанного по формуле (45) $\ln \bar{a}_s$ для полога пихтово-еловых древостоев. Объяснения см. в тексте.

где b — видовой коэффициент, зависящий в первую очередь от a_{Π} и типа размещения. Для древостоев с доминированием березы (*Betula mandshurica*) и осины (*Populus davidiana*) $b=2,5$, дуба (*Quercus mongolica*) $b=3,1$, ели (*Picea ajaensis*) и пихты (*Abies nephrolepis*) $b=3,45$.

Если вместо C_{Π} использовать a_{Π} и учесть некоторую среднюю для периода эффективную проекцию на направление солнечных

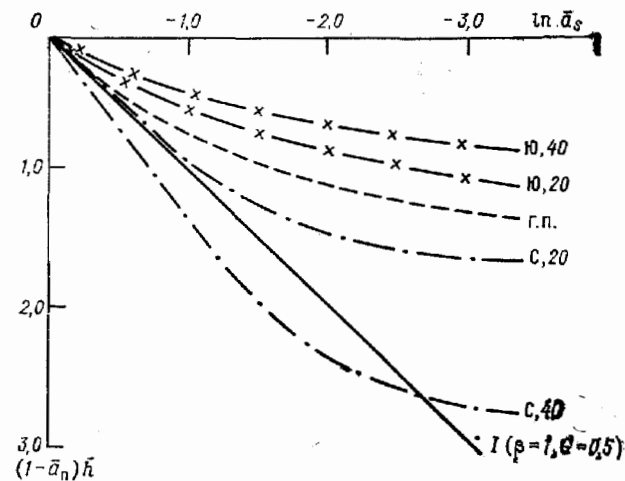


Рис. 48. Изменение рассчитанного по формуле (45) $\ln \bar{a}_s$ для полога пихтово-еловых древостоев.

Объяснения см. в тексте.

лучей, то среднюю функцию пропускания можно представить как

$$\bar{a}_s = e^{-(1-\bar{a}_{\Pi})hb'}, \quad (45)$$

где $(1-\bar{a}_{\Pi})$ — проективное покрытие с учетом внутрикороновых просветов, причем $\bar{a}_{\Pi} = f(C_{\Pi})$ и зависит от видового состава (см. рис. 41); $h = \cos B_c / \cos \alpha$ и $1/\sin h_{\odot}$. Коэффициент b' в (45) предположительно отражает совместное воздействие типа пространственного размещения и пространственной ориентации фитоэлементов и соответственно отклонение от чисто экспоненциального закона ослабления прямой радиации, характерного для случайного типа.

На рис. 48 изображена зависимость $\ln \bar{a}_s$ от эффективной проекции (определяемой средним за вегетационный период при $h_{\odot} = 45^\circ$ положением склона к солнечным лучам) на примере

пихтово-еловых лесов. Видно, что сохранение значений \bar{a}_s , характерных для определенного видового состава и C_{π} , на различных склонах возможно только при наличии разного типа структур. Из сравнения \bar{a}_s с экспоненциальной функцией (кривая 1) следует, что в целом низкие величины \bar{a}_s связаны с преобладанием регулярного типа. Но на южных склонах для обеспечения значений \bar{a}_s при одних и тех же C_{π} и a_{π} необходимо, чтобы гипотетический ценоз сформировал более выраженный регулярный тип размещения, чем на северных. Обеспечение тех же величин \bar{a}_s на северных крутых склонах возможно под пологом низкосомкнутых древостоев при наличии группового или случайного типа размещения, а при $C_{\pi} > 0,7$ — регулярного. Эти тенденции отражены в значениях коэффициентов b' , которые в большинстве рассмотренных случаев выше 1. Исключение составляют северные крутые склоны и варианты РП с $C_{\pi} < 0,5$. При увеличении C_{π} превышение b' относительно единицы возрастает.

Так как при $\bar{a}_{\pi} = \text{const}$ могут варьировать глубина полога, суммарный листовой индекс, вертикальный профиль изменения L , функция пространственной ориентации и т. п., следует осторожно трактовать величину $b' > 1$ как характеристику именно регулярного типа. Однако подтверждением того, что более низкие значения \bar{a}_s по сравнению с возможными при существующей ажурности зависят от типа размещения, служат данные фитометрических исследований. Кроме того, на примере горных мелколиственных лесов, в которых, помимо ажурности, определялись L и пространственная ориентация фитоэлементов [42, 82, 125], видно, как меняется параметр, отражающий непосредственно тип размещения (табл. 60). Общая тенденция состоит в том, что при равном L в ситуациях пониженного прихода радиации к верхней границе РП (например, северные склоны) для обеспечения равных значений \bar{a}_s в большей степени должна проявляться сгруппированность растений. При этом значения σ^2/\bar{x} , найденные путем обратного решения задачи через \bar{a}_s , близки к σ^2/\bar{x} , полученным при обработке планов проекций крон.

На рис. 49 представлена средняя функция пропускания прямой радиации для пихтово-еловых лесов, которая была получена в [136]:

$$\bar{a}_s = I\omega_0 + \bar{a}_{s_1}\omega_1 + \bar{a}_{s_2}\omega_2, \quad (46)$$

где \bar{a}_{s_1} и \bar{a}_{s_2} — соответственно пропускание прямой радиации через области, занятые одной кроной и несколькими кронами; в области ω_0 $\bar{a}_{s_0} = 1$.

При расчете \bar{a}_s по формуле (46) использовались данные о функциях ω для конкретных пробных площадей и измерений пропускания радиации через кроны ели [10, 36, 65]. На рис. 49 для сравнения приведены значения \bar{a}_s в предположении, что на каждой пробной площади при фиксированной величине η существует случайный тип размещения. При последнем $\omega_0 = e^{-\eta}$, $\omega_1 = \eta e^{-\eta}$ и $\omega_2 = 1 - e^{-\eta}$ — $\eta e^{-\eta}$ [136].

В равнинных (пр. пл. 13 и 15) и горном (пр. пл. 19) ельниках, для которых был установлен регулярный тип структуры, величины \bar{a}_s меньше тех, которые наблюдались бы при случайном типе. Не-

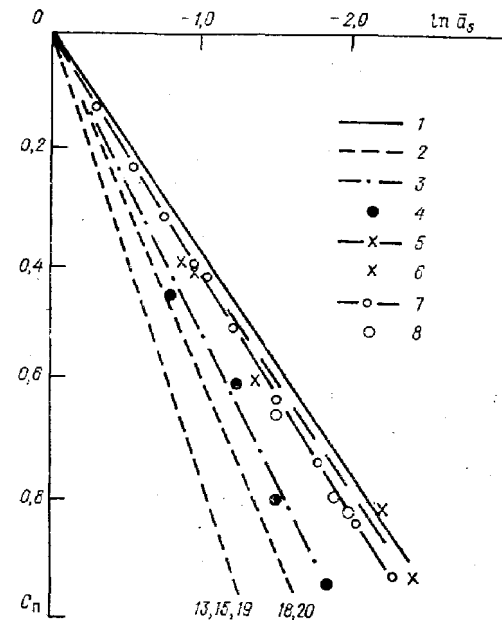


Рис. 49. Изменение рассчитанного по формуле (46) \bar{a}_s в зависимости от сомкнутости полога пихтово-еловых лесов.

1) средняя функция \bar{a}_s для совокупности пихтово-еловых лесов, рассчитанная по формуле (44); 2) случайный тип размещения; с учетом фактических функций ω : 3, 4) пр. пл. 18, 20, 5, 6) пр. пл. 13, 15, 7, 8) пр. пл. 19; цифры у кривых — номера пробных площадей (см. табл. 32).

значительные различия между фактическими \bar{a}_s под пологом этих лесов обусловлены наличием общих черт в строении древостоя, а именно, характером соотношения между C_{π} и η , а также функций ω . На двух других пробных площадях (18 и 20) были выявлены при равной C_{π} более высокие значения η и случайный тип размещения. Из рис. 49 видно, что в последнем примере тенденции в изменении \bar{a}_s соответствуют возможным для случайной структуры.

Однако в целом расчет \bar{a}_s через ω дает более высокие значения \bar{a}_s по сравнению с расчетом через ПСФ и функцию $\bar{a}_s = f(C_{\pi})$. Очевидно, это связано преимущественно с ошибками визуального определения областей ω по картам проекций крон, так как сами величины \bar{a}_{s_1} и тем более \bar{a}_{s_2} очень незначительны ($< 0,05$).

Рассмотренные выше примеры помогают понять механизм формирования зависимости $\bar{a}_s = f(C_{\pi})$. Несомненно, что различ-

Изменение параметра $\beta = \frac{1}{\sigma^2/x}$, используемого в формуле (43)

C_{Π}	L	Север				Юг			
		20°		40°		20°		40°	
		β	σ^2/x	β	σ^2/x	β	σ^2/x	β	σ^2/x
1,0	2,2	1,26	0,79	0,79	1,26	2,08	0,44	2,55	0,39
0,8	2,0	1,16	0,86	0,73	1,36	1,92	0,52	2,35	0,43
0,6	1,6	2,17	0,46	0,65	1,53	1,72	0,58	2,11	0,47

Примечание. Величина a_s приведена на рис. 47, для ценоза в целом взято значение $G = 0,5$.

ные расчетные методы оценок \bar{a}_s содержат систематические погрешности, которые пока нельзя определить из-за отсутствия достоверных и массовых данных о прямой радиации в РП, измеряемой с помощью актиометра. Однако несмотря на недостатки расчетных методов, с их помощью можно численно проверить и предсказать, к каким параметрам структуры РП или условиям прихода радиации чувствительны относительные характеристики прихода прямой радиации. Среднее значение \bar{a}_s как функцию сомкнутости можно использовать в тех исследованиях, где не требуется высокая точность результатов (например, в эколого-ландшафтных исследованиях, при сравнении энергоресурсов биogeосистем и т. п.).

III.2.2. Рассеянная радиация

Теоретически, исходя из экспонированности склона по отношению к зонам полусферы неба и закрытости горизонта, можно предполагать наличие определенных различий в пропускании зональной рассеянной радиации неба между равнинными и горными РП. Если принять, что угловое распределение рассеянной радиации неба соответствует равномерно яркому небу, то предполагаемые различия будут связаны только с экранированием склонами отдельных зон неба. В этом случае угловое распределение прошедшей через полог рассеянной радиации неба будет в основном определяться изменением коэффициентов прозрачности полога a_{θ_i} , осредненных для каждого альмукантата (см. рис. 39).

Для равномерно яркого неба максимум относительной рассеянной радиации отмечается в кольцевой зоне 30—60° [91, 104, 131, 132]. Под пологом горных пихтово-еловых лесов (рис. 50) наибольший вклад дает радиация, поступившая из зоны неба 20—40° (т. е. из зоны, которая перекрывается частью полога,

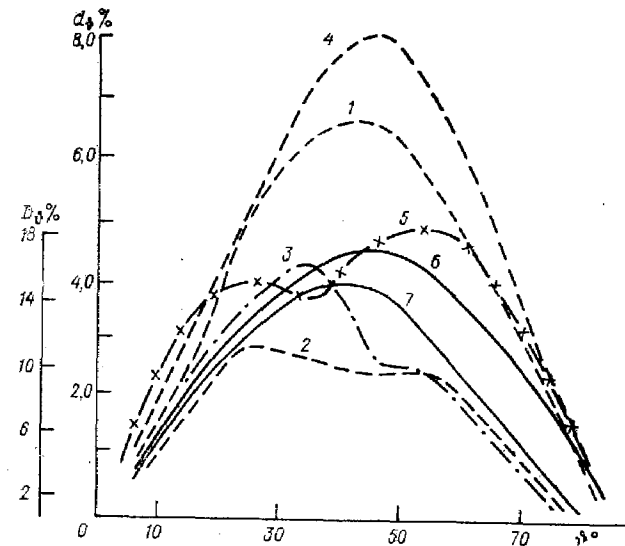


Рис. 50. Зональная рассеянная радиация d_z под пологом горных лесов (в % от относительной зональной радиации неба D_z).

Северный склон 15—18°: 1) березовый лес, $C_{\Pi}=0,7$, 2) осиново-березовый с еловым подростом, $C_{\Pi}=0,9$, 3) пихтово-еловый, $C_{\Pi}=0,8 \pm 0,9$; западный склон 30°: 4) березовый, $C_{\Pi}=0,6$, 5) дубовый, $C_{\Pi}=0,5 \pm 0,6$; 6) относительная зональная радиация при равномерно ярком небу; 7) то же с учетом влияния закрытости горизонта рельефом на западном открытом склоне крутизной 30° (для 6, 7 шкала D_z).

где сосредоточены основные межкрупные просветы). Аналогичные результаты были получены В. А. Алексеевым [10] и Н. В. Зукерт [79] для равнинных ельников ЕТС.

Полог мелколиственных древостоев не вносит каких-либо существенных отклонений по сравнению с распределением зональной радиации открытого неба. Независимо от экспозиции и крутизны склона при $C_{\Pi} < 0,7$ максимум радиации поступает из зоны 35—55°, под пологом высокосомкнутых древостоев (при общем низком уровне) зона максимума размыта от 20 до 60° (рис. 50).

Несколько отличаются по характеру ослабления зональной радиации широколиственные (дубовые) древостой: основной

максимум D_0 поступает из зоны $45-65^\circ$, вторичный — из зоны $15-30^\circ$. Причем образование основного максимума связано с прохождением радиации через область ниже кронового пространства. То, что распределение зональной радиации определяется именно расположением просветов, подтверждается кривой 7 на рис. 50, характеризующей ослабление зональной радиации

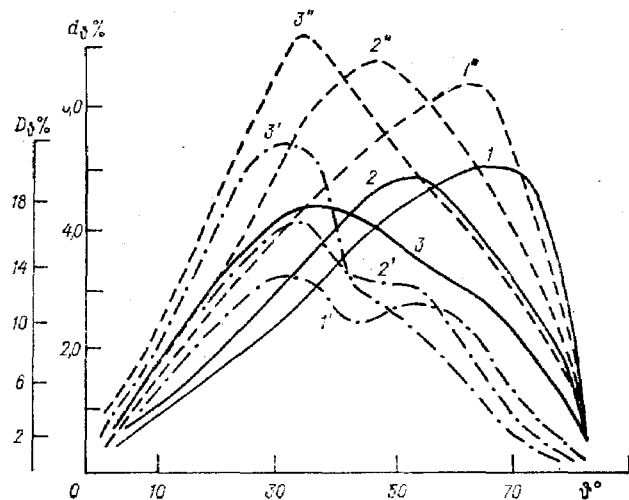


Рис. 51. Изменение относительной зональной радиации при различной высоте Солнца.

1, 2, 3) зональная радиация неба при среднезамутненной атмосфере [132] (шкала D_0); 1', 2', 3') под пологом елового древостоя, $C_{II}=0,8$, C , 15° ; 1'', 2'', 3'') под пологом березового древостоя, $C_{II}=0,7$, C , $16-18^\circ$; 1, 1', 1'') $h_{\odot}=20^\circ$; 2, 2', 2'') $h_{\odot}=40^\circ$; 3, 3', 3'') $h_{\odot}=60^\circ$.

ции в этой же точке только из-за закрытости горизонта склонами.

В течение дня угловое распределение рассеянной радиации при ясном небе изменяется с h_{\odot} . Для открытого неба по мере увеличения h_{\odot} максимум D_0 сдвигается в кольцевые зоны $25-45^\circ$, при $h_{\odot} < 30^\circ$ $D_{0 \max}$ поступает из зон $55-75^\circ$ и относительный максимум D_0 выражен более сильно. Под пологом положение зон с $D_{0 \max}$ при различных h_{\odot} сохраняется только в мелколиственных лесах (рис. 51). Но, в отличие от открытого неба, относительный максимум проявляется в большей степени при увеличении h_{\odot} . Под пологом пихтово-елового древостоя положение кольцевой зоны, из которой поступает максимум рассеянной радиации неба, практически не зависит от h_{\odot} . Последнее подтверждает преобладающую роль межкрупных просветов и

в пропускании рассеянной радиации неба. Это в свою очередь позволяет анализировать a_D как функцию сомкнутости.

Изменение средней за вегетационный период величины \bar{a}_D в зависимости от C_{II} и видового состава древесного яруса горных лесов показано на рис. 52. Результаты, полученные для

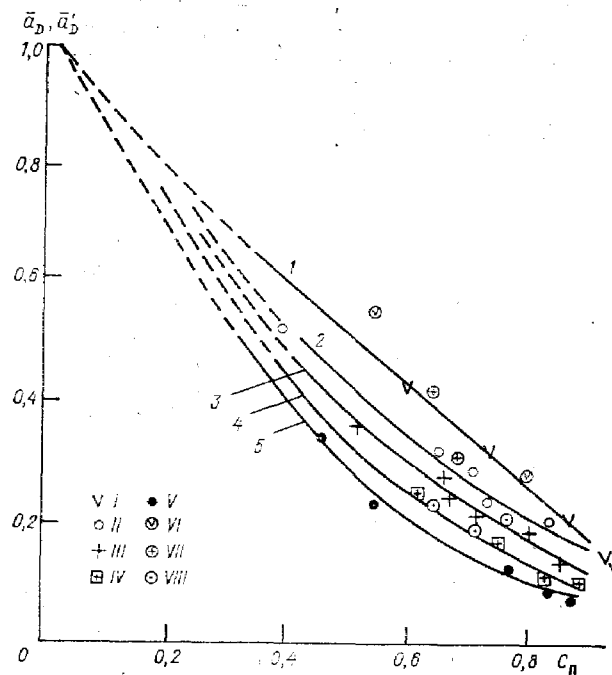


Рис. 52. Изменение среднего за вегетационный период пропускания рассеянной радиации в зависимости от сомкнутости полога древостоя горных лесов Приморского края.

\bar{a}_D : 1) березовые леса, 2) лиственничные, 3) дубовые, 4) широколиственно-кедровые, 5) пихтово-еловые; \bar{a}'_D ФАР: 1) березовые, II) лиственничные, III) дубовые, IV) широколиственно-кедровые, V) пихтово-еловые; a_D ИНТ: VI) березовые, VII) дубовые, VIII) пихтово-еловые леса.

древостоев одного видового состава, приуроченных к склонам различной крутизны и экспозиции, хорошо ложатся на одну кривую. Это говорит о том, что ведущим фактором в определении a_D является структура самого РП. Различия в величинах \bar{a}_D между древостоями различного видового состава, но равной сомкнутости обусловлены различиями в \bar{a}_{II} . Последние в свою очередь отражены в значениях коэффициентов b_1 , входящих

в степень экспоненты, удовлетворительно описывающей функцию

$$\bar{a}_D = f(C_{\Pi}) = e^{-b_1 C_{\Pi}}, \quad (47)$$

где b_1 для елово-пихтовых древостоев равно 2,6; для широколиственно-кедровых — 2,3; дубовых — 2,0; лиственничников — 1,9; мелколиственных с господством березы и осины — 1,7. Причем значения b_1 с большим основанием можно трактовать как отражающие зависимость $a_{\Pi} = f(C_{\Pi})$, ибо ослабление рассеянной радиации неба практически не зависит от типа размещения и пространственной ориентации фитоэлементов [114, 137, 154, 192, 212, 222, 228, 233, 292].

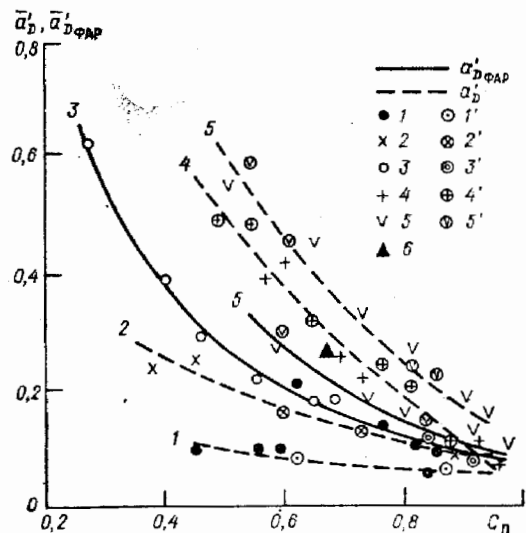


Рис. 53. Изменение a'_D и a_D ФАР в равнинных (1—6) и горных (1'—5') лесах в зависимости от сомкнутости и доминанта древесного яруса.

1) пихта, 2) кедр, 3) ель, 4) дуб, 5) береза, 6) еловые леса северной тайги ЕТС; использованы собственные данные и данные из [10, 59, 68, 79, 133, 142, 143, 223, 268, 282].

На рис. 52 нанесены также точки, соответствующие средним величинам пропускания, полученным на тех же участках на основе непосредственных измерений в пасмурную погоду (\bar{a}_D). Хорошее совпадение между \bar{a}_D и a_D отмечается для ФАР. Пропускание рассеянной ИНТ радиации в большинстве случаев выше. Так как сравнение проведено для пасмурной погоды,

когда составляющая i_s отсутствует, то характер соотношения $\bar{a}'_{D_{\text{ИНТ}}} > \bar{a}'_{D_{\text{ФАР}}}$ определяется более интенсивным поглощением в РП ФАР.

Из рис. 53 очевидно, что при одном лесообразователе и равной C_{Π} горные леса практически не отличаются от равнинных по уровню пропускания рассеянной радиации. Ниже всего пропускание ИНТ радиации (и ФАР) положом при доминировании пихты (сибирской и белокорой). Далее идут еловые и кедровые леса при доминировании европейских, сибирских и дальневосточных видов ели и кедра. Полог дуба черешчатого (лесостепная зона ЕТС) и монгольского (Дальний Восток) также создает равные условия пропускания D . Наиболее прозрачный полог формируется в каменноберезняках Камчатки [10]. Древостой с доминированием березы маньчжурской и осины Давида занимают промежуточное положение в группе березовых лесов.

Причем наиболее низкие значения a_D характерны для древостоев из березы пушистой и бородавчатой. Однако различия в прозрачности полога между европейскими и дальневосточными березняками незначительны и обусловлены не столько разницей в прозрачности крон, сколько низкоствольностью последних.

Результаты сравнений в общем согласуются с выводом, что внутри рода (или экобиоморфы) прозрачность кроны a_{kr} является достаточно стабильной характеристикой, хотя очевидно, что a_{kr} зависит и от возраста, и от условий произрастания. Последнее подтверждается фактом большего пропускания при равной сомкнутости северных ельников по сравнению с ельниками южной тайги ЕТС [10, 47, 59, 79].

III.2.3. Суммарная радиация

Для горных лесов при расчете пропускания суммарной ФАР был использован упрощенный и несколько модифицированный вариант полуэмпирической формулы, предложенной Ю. К. Россом [139] и Х. Г. Тоомингом [158]:

$$a_Q = (1 - c) e^{-b' C_{\Pi} \frac{\cos B_c}{\cos \alpha}} + c e^{-b_1 C_{\Pi}}, \quad (48)$$

где $e^{-b' C_{\Pi} \frac{\cos B_c}{\cos \alpha}} = a_s(h_{\odot})$ и $e^{-b_1 C_{\Pi}} = a_D$, $c = 1/(1 + \gamma)$ и $\gamma = S^*/D^*$. Слагаемое, характеризующее i_s и i_D не учитывалось, так как, во-первых, эти составляющие не поддаются точному расчету через параметры просветов [113 и др.] и, во-вторых, вклад дополнительных рассеянных потоков для ФАР не существен [137, 154, 192, 212 и др.].

В формуле (48) $C_{\Pi} \cos B_c / \cos \alpha$ характеризует эффективную проекцию относительно суммарной площади проекций крон без учета взаимных перекрытий этих проекций. Отсюда дополнительные параметры b' и b_1 отражают внутрикрановую прозрач-

ность и прозрачность в области взаимных перекрытий. Тип пространственного размещения крон в неявном виде входит в величину b' .

Следует подчеркнуть, что высокие меры сопряженности между C_{Π} и пропусканием радиации (при $h_{\odot} = 50^{\circ}$ $K = 0,4 \div 0,5$) оправдывают использование этой характеристики структуры в формулах, описывающих ослабление радиации в РП. По данным Н. В. Зукерта [79], для равнинных ельников меры сопряженности между a_Q и сомкнутостью того же порядка ($K = 0,42$). K незначительно возрастает (до 0,45) при использовании в совместном анализе вместо C_{Π} характеристики a_{Π} . Наиболее тесная связь выявляется в ясную погоду при больших h_{\odot} и в пасмурную. Последнее определяется положением зоны полога с максимальной ажурностью по отношению к кольцевой зоне неба с максимумом рассеянной радиации. Как было показано выше, аналогичный характер распределения просветов выявлен и для горных темнохвойных лесов.

Результаты расчета a_Q при ясной погоде и $h_{\odot} = 44 \div 60^{\circ}$ для мелколиственных древостоев (северные и западные склоны различной крутизны) приведены на рис. 54. Значение c принималось равным 0,28, что соответствует $D^* = 0,4$ от S^* . На этом же рисунке приведена эмпирическая функция $a'_{Q_{\text{ФАР}}}$, полученная на основе непосредственных измерений для тех же условий погоды и h_{\odot} . Суммарная ошибка расчетных значений $a_{Q_{\text{ФАР}}}$ составляет $\pm 18\%$, $a'_Q = \pm 14\%$.

При $h_{\odot} = \text{const}$ $a_{Q_{\text{ФАР}}} > a'_{Q_{\text{ФАР}}}$ для всех значений C_{Π} . В случае $C_{\Pi} < 0,7$ различия лежат в пределах ошибок расчета $a_{Q_{\text{ФАР}}}$, а при $C_{\Pi} \geq 0,7$ $a'_{Q_{\text{ФАР}}}$ достоверно ниже расчетных функций.

Вполне возможно, что различия обусловлены завышением a_s более чем на 10% за счет полутени. Кроме того, исходя из теоретических представлений о влиянии типа размещений на пропускание прямой радиации [114, 137, 233], можно полагать, что характер соотношения величин a_Q и a'_Q определяется, очевидно, возрастающей упорядоченностью пространственной структуры древостоя березы по мере увеличения C_{Π} . Однако этот вывод требует проверки на основе более детальных измерений структуры древостоев.

В целом достаточно хорошая сходимость величин $a_{Q_{\text{ФАР}}}$ и $a'_{Q_{\text{ФАР}}}$ (см. также [79, 113, 199]) позволяет использовать расчетные данные для оценок средних характеристик радиационного режима в области ФАР.

На рис. 55 показано изменение среднего за вегетационный период с $t_b > 10^{\circ}\text{C}$ пропускания суммарной ФАР в зависимости

от C_{Π} древостоев с доминированием ели аянской и пихты белой, дуба монгольского и березы маньчжурской. Правомочность определения средних функций пропускания на основе группировки данных по доминанту древесного яруса (независимо от характеристик рельефа) подтверждается данными

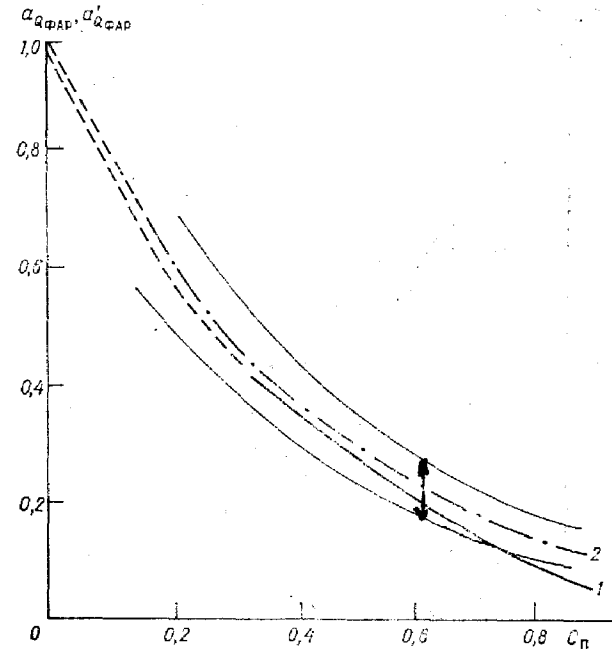


Рис. 54. Изменение рассчитанного по формуле (48) a_Q и фактического a'_Q коэффициента пропускания суммарной ФАР в зависимости от сомкнутости древостоев березы маньчжурской. Ясно; $h_{\odot} = 55 \div 65^{\circ}$.

1) a'_Q 2) a_Q ; стрелкой показан предел возможных отклонений a_Q .

рис. 56. Функция \bar{a}'_Q , представленная на рис. 55, определялась через суммы ФАР под пологом леса (индекс «п») и на открытом склоне (индекс «о») той же крутизны и экспозиции по формуле

$$\bar{a}'_Q = (1 - c) \bar{a}_s + c \bar{a}_D, \quad (49)$$

(где $\bar{a}_s = \overline{\sum S_{\Pi}^* / \sum S_0^*}$ и $\bar{a}_D = \overline{\sum D_{\Pi}^* / \sum D_0^*}$) с учетом соотношения между приходящей к верхней границе РП прямой и рассеянной радиации для каждого конкретного склона.

Из всех рассмотренных типов леса, относящихся к характерным формациям юга Приморья, наиболее интенсив-

ное ослабление происходит в древостоях при доминировании ели аянской и пихты белокорой. Наибольшей светопрозрачностью характеризуются древостои, где доминируют различные виды берез и осины Давида. Широколиственно-кедровые леса по ин-

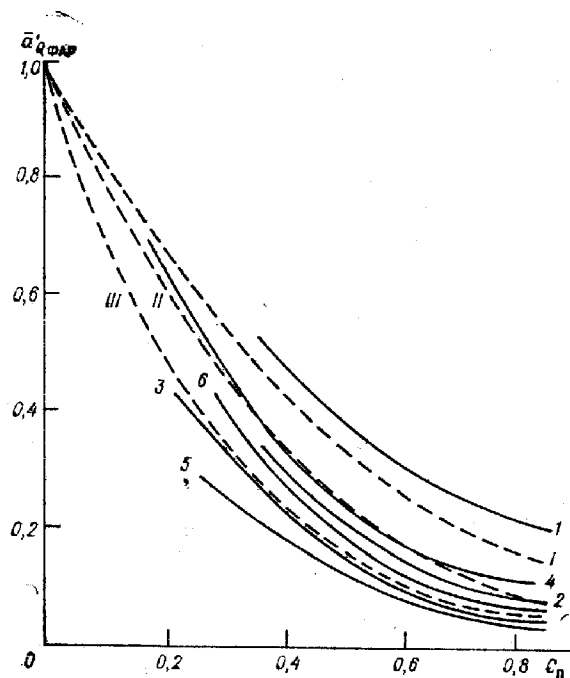


Рис. 55. Изменение $\bar{a}'_{Q \Phi AP}$ за вегетационный период в зависимости от сомкнутости полога древостоев горных лесов при доминировании *Betula mandshurica*, *Populus davidiana* (I), *Quercus mongolica* (II), *Picea ajanensis*, *Abies nephrolepis* (III) и равнинных лесов (1—6).

1) каменноберезовые леса [10], 2, 6) березовые леса из *Betula pendula* и *Betula pubescens* (2 — по [10], 6 — по [164]); 3) южнотаежные еловые леса [10], 4) южнотаежные сосновые леса [10]; 5) еловые леса [164]; 1—4) при $\bar{h}_0 = 35^\circ$ в ясной погоде, 5, 6) средние за сезон.

тенсивности ослабления радиации приближаются к елово-пихтовым. В последних главным потребителем солнечной энергии являются доминирующие породы: ель и пихта. Напротив, в широколиственно-кедровых лесах оптические свойства верхних растительных ярусов определяются не столько свойствами кедра (особенно при разреженном ярусе кедра в спелых насаждениях), сколько свойствами субдоминирующих пород и плот-

ным заполнением фитомассой всего объема подкоронового пространства.

Подобные изменения в средних величинах пропускания радиации древостоями в зависимости от их видового состава получены и для равнинных лесов [10, 35, 57, 59, 68, 196, 201, 205, 206, 208, 213, 217, 219, 223—225, 239, 249, 252, 253, 258, 266—270, 281—286].

Достаточно близкие значения функций пропускания радиации для самых разнообразных вариантов РП свидетельствуют

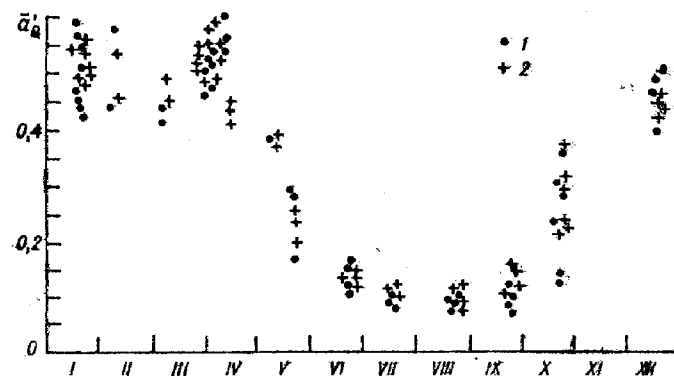


Рис. 56. Годовой ход пропускания ИНТ радиации пологом дубовых древостоев на северном (1) и южном (2) склонах крутизной 37° ; $\varphi = 35^\circ$, $H = 1150$ м.

На северном склоне $L = 6,1$, на южном $L = 3,5$. Составлено по данным [282].

о том, что растительное сообщество в целом, независимо от его видового состава и условий произрастания, стремится к максимально возможному поглощению радиации. Достигается этот максимум различными путями: за счет усложнения вертикальной структуры, набора видов, адаптационных приспособлений структуры отдельных растений, ярусов и всего ценоза.

III.3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАДИАЦИОННОГО ПОЛЯ ПОД ПОЛОГОМ ЛЕСА

Рассмотренные выше отношения характеризуют средний для фитоценоза режим радиации, складывающийся в течение вегетационного периода. Средние значения относительных радиационных характеристик фитоценоза представляют интерес при расчетах составляющих радиационного и теплового баланса, а также при территориальном сравнении энергетики различных фитоценозов и биосистем. Однако неравномерное распре-

Изменение коэффициента $\varepsilon = \sigma_1^2/\sigma_0^2$ в зависимости от степени открытости участка при ясной погоде

Древостой	Высота измерений, м	Характеристика участка	h_{\odot}°		
			>45	40-30	<30
Еловый	20,6	Крона	13,0	2,0	0,1
		Окно	255,0	23,0	0,1
	15,3	Крона	10,1	0,1	0,2
		Окно	0,1	7,4	0,1
Сосновый	24,0	Крона	39,4	35,6	0,3
		Окно	159,0	2,0	0,1
	20,0	Окно	42,5	15,9	1,9
		16,0	Окно	33,3	13,1	5,1
12,0	Окно	0,1	30,1	4,2	

Примечание. σ_1^2 — дисперсия абсолютных значений радиации на i -м уровне РП за определенный интервал времени, σ_0^2 — то же на верхней границе РП за тот же интервал времени.

В пасмурную погоду $\sigma_{a'Q}^2$ снижается по мере смыкания крон, что объясняется прежде всего однородным характером радиации, поступающей к верхней границе РП. В крайних вариантах сомкнутости как в пасмурную погоду, так и при малых h_{\odot} дисперсия в 2—3 раза, а при $C_{\Pi}=0,3 \div 0,7$ в 10—20 раз ниже, чем в полуденные часы при ясном небе. При этом следует отметить, что величина дисперсии при различных h_{\odot} изменяется в больших пределах, чем a_Q .

Аналогичные тенденции в изменении пространственного разнообразия радиационных условий сохраняются и в горных лесах [46, 142]. Горные условия не вносят принципиальных отклонений от общей обусловленности пространственно-временной структуры радиационных полей характером распределения и размерами фитоэлементов. Единственное, на что стоит обратить внимание, это увеличение $\sigma_{a'Q}^2$ в послеполуденные часы на западных склонах (соответственно до полудня на восточных) под пологом низко- и среднесомкнутых древостоев в ясную погоду. Хотя в принципе причина увеличения разнообразия та же, что и при возрастании h_{\odot} в равнинных лесах. Иными словами, максимум $\sigma_{a'Q}^2$ при равных характеристиках структуры РП приурочен

ление радиации внутри РП (выраженное в чередовании бликов, теней, полутеней и очевидное даже при визуальной оценке) указывает на несостоятельность средних значений при изучении радиационного режима как эколого-физиологического фактора. Последнее подтверждается, во-первых, величиной ошибок (до 30 %) при расчете интенсивности газообмена по среднему значению радиации без учета статистического характера ее распределения в ценозах [98]; во-вторых, тем, что фотосинтетическая деятельность растений, их рост и развитие протекают неодинаково при переменном и постоянном режимах освещения [102, 103, 154, 165, 175 и др.]; в третьих, тем, что видовой состав нижних растительных ярусов, неравномерность в распределении микрогруппировок по площади в значительной степени определяются интенсивностью радиации и неоднородностью пространственной структуры радиационного поля [10, 42, 49, 51, 65 и др.] и т. д.

В работе [47] была рассмотрена зависимость статистических характеристик пространственных радиационных полей от структуры древесного яруса равнинных ельников. Так, при коэффициентах корреляции 0,57—0,61 между площадью просветов x и \bar{a}_Q была получена следующая зависимость:

$$\ln \bar{a}_Q = a \ln x + b, \quad (50)$$

где $1 \text{ м}^2 \leq x \leq 25 \text{ м}^2$, $a=0,32$ и $b=0,98$ (для условий ясной погоды и $h_{\odot}=45^{\circ}$). Сохранение подобной зависимости позже было доказано в работе [142] для горных темнохвойных лесов Западного Саяна.

В отличие от закономерного возрастания \bar{a}_Q по мере увеличения площади просветов (и соответственно при уменьшении C_{Π}), максимум дисперсии пропускания $\sigma_{a'Q}^2$ отмечается при $C_{\Pi}=0,3 \div 0,7$ [47, 142]. Снижение $\sigma_{a'Q}^2$ при $C_{\Pi}>0,7$ ($h_{\odot}>45^{\circ}$, ясно) обусловлено в основном нивелирующим влиянием структуры полога.

Как следует из данных табл. 61, дисперсия в «окнах» ($C_{\Pi}<0,3$) определяется преимущественно разнообразием радиационных условий на верхней границе РП. Однако по вертикальному профилю в «окнах» выделяется уровень верхней части кроны, где отмечается резкое увеличение $\sigma_{a'Q}^2$, связанное с влиянием неравномерного затенения окружающих деревьев. Последнее является следствием как передвижения теней, так и качания веток ветром. При низких h_{\odot} собственное влияние структуры в определении $\sigma_{a'Q}^2$ в большей степени проявляется в случае более высокой прозрачности полога (как это видно на примере соснового леса).

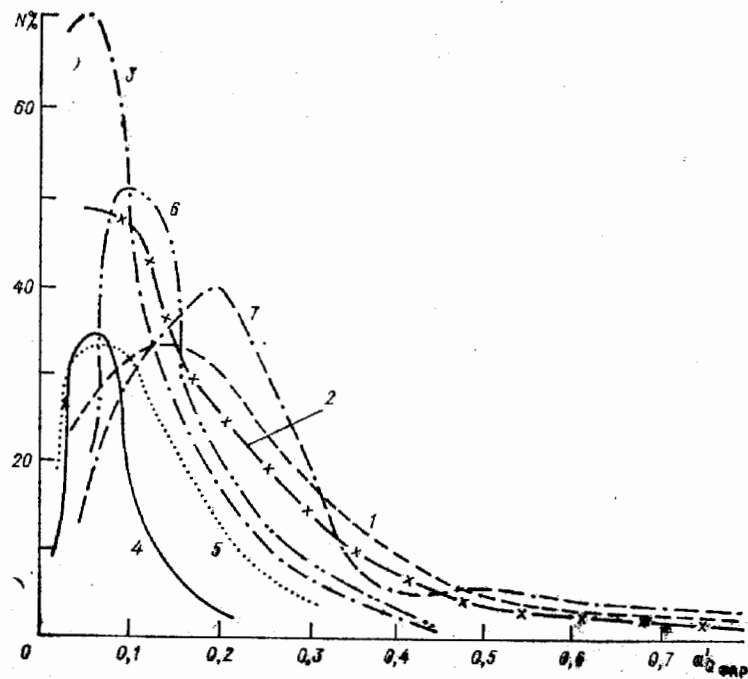
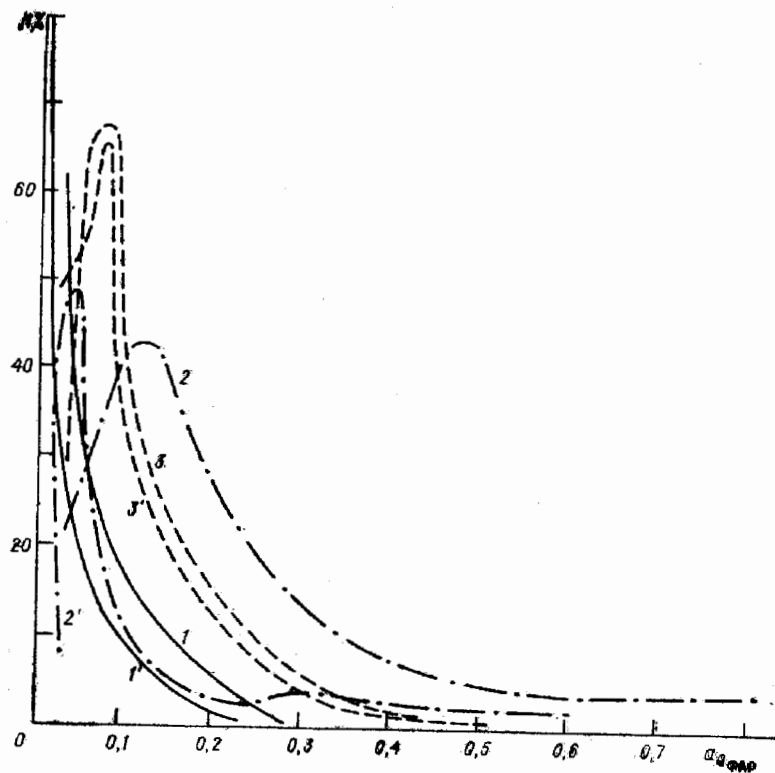


Рис. 59. Распределение a'_Q ФАР под пологом букового древостоя ($C_n = 0,85$) на юго-восточном склоне в ясную погоду.

1, 2) $h_{\odot} = 22^\circ$, 3, 4) $h_{\odot} = 42 \div 48^\circ$; 1, 3) до полудня, 2, 4) после полудня [10].

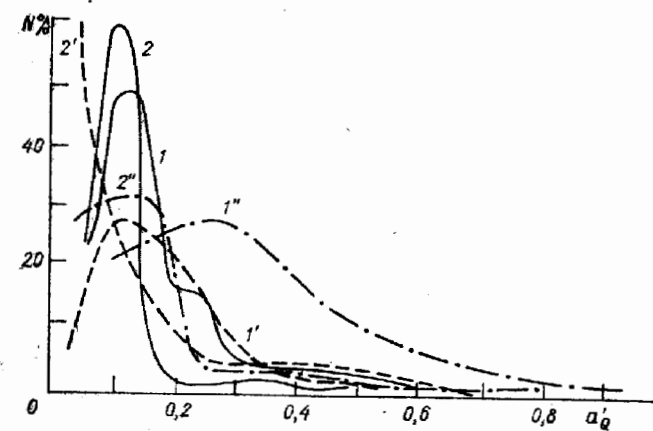
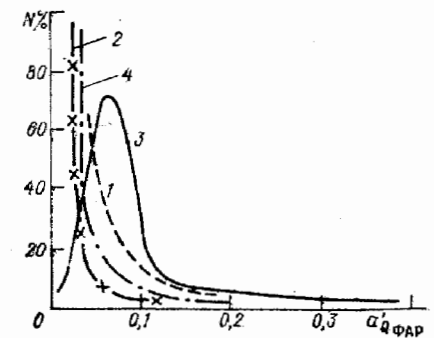


Рис. 60. Распределение a'_Q в ясную погоду под пологом темнохвойных лесов Западного Саяна на северо-восточных склонах при $h_{\odot} > 45^\circ$ (1, 1', 1'') и $h_{\odot} > 30^\circ$ (2, 2', 2'').

1, 2) кедровый крупнотравно-папоротниковый черневой лес, $H = 500$ м, склон 5° , $C_n = 0,65$; 1', 2') пихтовый чернично-щитовниковый горно-таежный, $H = 1000$ м, склон 20° , $C_n = 0,60$; 1'', 2'') пихтовый с кедром чемерицево-кочедыжниковый субальпийский, $H = 1450$ м, склон 20° , $C_n = 0,45$ (составлено по данным [142, 143]).

Рис. 57. Распределение a'_Q ФАР в полуденные часы при ясной погоде под пологом равнинных (1—3) и горных (1'—3') лесов при $C_n = 0,7$.

1 — еловые, 2 — сосновые, 3, 3' — мелколиственные, 1' — пихтово-еловые, 2' — широколиственно-кедровые леса.

Рис. 58. Распределение a'_Q ФАР при $h_{\odot} > 45^\circ$ и ясной погоде под пологом горных лесов Приморского края.

Мелколиственные леса, северные среднекрутые склоны: 1) $C_n = 0,5$, 2) $C_n = 0,6 \div 0,7$, 3) $C_n = 0,7 \div 0,8$; широколиственно-кедровые леса: 4) С, 20° , $C_n = 0,8$, 5) Ю, 20° , $C_n = 0,7$; березовый лес, 3, 30° , $C_n = 0,5 \div 0,6$; 6) до полудня, 7) после полудня.

ко времени максимальной высоты Солнца для конкретного местообитания.

Из сравнения рис. 57—60 видно, что при фиксированной h_{\odot} и одноптипных условиях облачности общий вид кривых распределения a_Q определяется видовым составом и сомкнутостью древостоя, независимо от приуроченности РП к различным формам рельефа. Наиболее низкие значения a_Q из рассмотренных древостоев характерны для пихтово-еловых и буковых лесов [10, 46, 143]. Широколиственно-кедровые леса при доминировании в древостое представителя рода *Pinus* по типу распределения (и уровню пропускания в целом) существенно отличаются от чистых сосновых лесов умеренной зоны [10, 46, 59, 133, 140, 164, 196, 206, 217 и др.]. Эти различия связаны не столько с разницей в ажурности крон сосны и кедра корейского, сколько со специфичной многоярусной структурой полога широколиственно-кедровых лесов Приморского края [90]. В связи с этим широколиственно-кедровые леса по типу кривых распределения a_Q приближаются к пихтово-еловым.

На характер распределения пропускания радиации при близкой величине C_{π} экспозиция склона практически не оказывает влияния. Последнее иллюстрируется рис. 58, из которого следует, что различия на диаметрально противоположных склонах обусловлены преимущественно разницей в сомкнутости полога. На крутых склонах с западной и восточной составляющими вид распределения a_Q существенно различается в дополуденные и послеполуденные часы (рис. 58—59). Это не означает, что между равнинными и горными лесами существуют принципиальные различия в характере изменения относительных величин радиации под пологом. Максимум a_Q и соответствующий вид кривой распределения, наблюдаемый в равнинных лесах в полуденные часы, отмечается в горных лесах при максимальном угле падения солнечных лучей на склон конкретной экспозиции и крутизны. Различные отклонения, возможные как в тех, так и в других РП, возникают за счет неравномерной структуры полога верхних ярусов.

Как для равнинных, так и горных лесов различного видового состава при $C_{\pi} > 0,6$ типичны одномодальные кривые распределения a_Q с левой асимметрией [10, 35, 38, 44, 45, 47, 68, 140, 142, 223, 247, 267, 271, 273, 281]. Причем вероятность моды в низких значениях a_Q возрастает при увеличении C_{π} . Вероятность второй моды при $a_Q > 0,6$, формирующихся за счет высоких интенсивностей радиации в солнечных бликах [10, 47, 98, 235, 238, 239, 264 и др.], относительно мала, и второй максимум у кривой распределения возможен только в разреженных участках (или на опушках леса). Анализ эмпирических кривых распределения a_Q показал, что в большинстве случаев они отли-

чаются от нормального закона распределения [1, 10, 34, 35, 47, 68, 79, 98, 140, 142, 163, 247, 273 и др.] и соответствуют I типу кривых Пирсона [1, 47, 68, 143]. В отдельных ситуациях (при $h_{\odot} < 30^{\circ}$, пасмурной погоде, высокой сомкнутости) эмпирические распределения соответствуют VII и VI типам распределения Пирсона, для которых характерна симметричность относительно средних величин. [106]. Причем в мелколиственных лесах распределения, близкие к VI типу, встречаются более часто, что связано с достаточно однородным распределением просветов в пологе крон. Только на очень разреженных участках в ясную погоду при $h_{\odot} > 45^{\circ}$ и сохранении I типа статистически достоверным является загиб вверх правой ветви кривой распределения при больших величинах a_Q , образование которых связано с пропусканием прямой радиации через ω_0 .

Таким образом, пространственная структура радиационного поля прежде всего отражает пространственную изменчивость структуры полога яруса, ослабляющего падающий поток радиации. Преобладающая роль структуры подтверждается соответствием эмпирических распределений величин пропускания в самых разнообразных типах РП одним и тем же типам теоретических распределений. Последнее указывает также на адаптивный характер структуры полога верхних ярусов в целом. Адаптация к условиям прихода радиации через внутреннюю упорядоченность структуры направлена на максимально возможное поглощение радиации в каждом конкретном месте произрастания. Это свидетельствует о том, что максимальное использование падающей радиации, выявленное для отдельного растения [36, 48, 176], сохраняется и на ценооточеском уровне. Видовой состав и структура конкретных РП (отражающие теневыносливость доминант и условия произрастания) определяют уже уровень ослабления радиации.

III.4. ВЛИЯНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПРИХОД РАДИАЦИИ В УСЛОВИЯХ ГОРНОГО РЕЛЬЕФА

Рассмотренные в главе I условия прихода радиации к открытым склонам отражают радиационные характеристики климата горных районов, которые формируются в результате совокупного воздействия геофизических факторов, облачности и самого рельефа. Как следует из данных, проанализированных в предыдущих параграфах этой главы, растительность является наиболее мощным климатообразующим фактором в плане ослабления радиации, поступающей к подстилающей поверхности склонов. Так, ослабление радиации сомкнутым пологом на порядок больше, чем ослабление радиации сплошной облачностью ниж-

него яруса. Оно также существенно больше, чем снижение радиации, вызванное северной ориентацией крутых склонов.

Несомненно, что дополнительная трансформация солнечной радиации растительностью способствует формированию принципиально отличных от открытых склонов радиационных условий на уровне подстилающей поверхности. В свою очередь это определяет специфику физических, биологических и химических процессов, происходящих в почве, приземном слое воздуха и деятельном слое растительности. Очевидно, например, практическое значение данных о приходе радиации к подстилающей поверхности открытых и облесенных склонов для различного рода лесохозяйственных мероприятий и прежде всего для практики лесовосстановительных работ.

III.4.1. Суммы радиации под пологом древесного яруса

Рассмотрим суммы радиации на уровне подстилающей поверхности облесенных склонов. Эти суммы рассчитывались на основе данных о приходе радиации к верхней границе РП и средних за сезон коэффициентов пропускания радиации. Так как суммы радиации для открытых склонов определены с учетом средних многолетних условий облачности, то суммы радиации под пологом (ΣS_d^* , ΣQ_d^*) также можно рассматривать как среднюю климатологическую характеристику энергоресурсов в условиях облесенных склонов. Правомочность такого предположения подтверждается и тем, что относительное ослабление радиации является достаточно стабильной во времени характеристикой сформировавшегося ценоза [35, 46, 125].

В фиксированной точке под пологом леса может наблюдаться любой тип дневного хода радиации. Чаще всего на общую тенденцию накладываются случайные колебания, вызванные как характером размещения просветов, так и влиянием ветра. Осредненные по площади данные более объективно отражают основные тенденции дневного хода радиации в различных местообитаниях. В целом симметричный дневной ход характерен для южных и северных склонов. Типичная для западных и восточных открытых склонов асимметрия может усугубляться или нивелироваться в зависимости от прозрачности полога и размещения просветов (рис. 61). При сравнении рис. 45 и 61 видно, что независимо от дневной динамики a_s на западных и восточных склонах дневной ход абсолютных сумм радиации под пологом имеет асимметрию, обусловленную ориентацией склона. Последнее справедливо прежде всего для крутых склонов и низкосомкнутых древостоев.

Сезонный ход сумм радиации под пологом леса связан прежде всего с фенологическими ритмами развития растений. Очевидные различия формируются между лиственными и темно-

хвойными лесами в период после сбрасывания листвы (хвои у лиственницы). В безлиственный период под полог древостоя в среднем поступает 50—70 % радиации, поступившей к верхней границе РП [35, 95, 140, 205, 213, 223, 266, 268, 270]. Но эта величина может быть меньше на склонах северных экспозиций из-за преобладания низких h_0 . Так, по нашим эпизодическим наблюдениям, в Среднем Сихотэ-Алине под полог березового древостоя на северный склон в течение зимы поступает менее 45 % от ΣQ_d^* открытого склона. В то же время на более низких широтах дубовые древостои, расположенные на северных и южных склонах, в зимний период ослабляют нисходящий поток суммарной радиации практически одинаково (см. рис. 56). В рассмотренном случае значимые различия в пропускании были зафиксированы

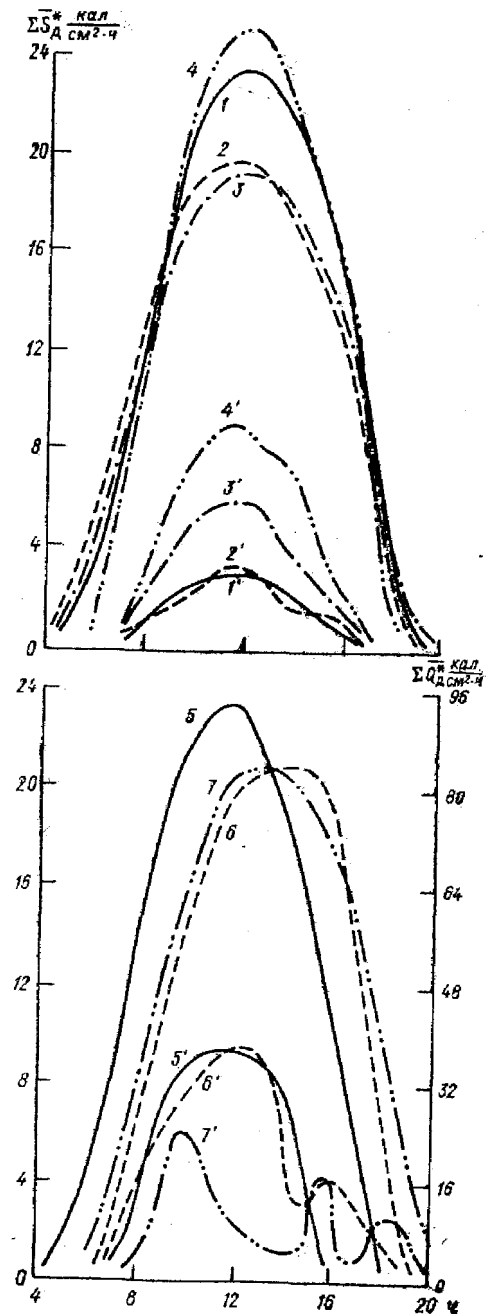


Рис. 61. Дневной ход в июне ΣS_d^* (1—6), ΣQ_d^* (7) на открытом склоне и ΣS_d^* (1'—6'), ΣQ_d^* (7') под пологом средне-сомкнутых древостоев.

Средний Сихотэ-Алине: 1, 1') плоский водораздел, еловый лес; 2, 2') ССВ, 20°, еловый лес; 3, 3') С, 20°, широколиственно-кедровый лес; 4, 4') Ю, 20°, широколиственно-кедровый лес; 5, 5') В, 10°, дубовый лес; 6, 6') З, 30°, дубовый лес; Тянь-Шань: 7, 7') ЮЗ, 20°, еловый лес.

только в середине апреля за счет более раннего развития листвы у деревьев на южном склоне [282].

Сезонные изменения оптических свойств полога темнохвойных лесов определяются двумя причинами: во-первых, динамикой старения, опада и нарастания хвои текущего года, во-вторых, наличием отсутствующих лиственных пород и их фенологией [10 и др.]. По нашим данным, в зимний период прозрачность полога широколиственно-кедровых лесов увеличивается в 2—3 раза, пихтово-еловых — менее чем в 1,5 раза по сравнению с серединой вегетационного периода. Из литературы также известно, что некоторое увеличение радиации под пологом в зимний период связано с возрастанием дополнительной рассеянной радиации при наличии снежного покрова [68, 95, 133, 140 и др.].

Вследствие сезонной динамики оптических свойств полога может кардинально измениться соотношение зимних и летних сумм радиации, характерное для открытых склонов. Так, например, в условиях Приморского края (табл. 62) годовая ам-

Таблица 62

Различия между ΣQ_d^* за июнь и январь на открытых и облесенных склонах в условиях Приморского края (%)

Открытые склоны	Пихтово-еловые леса	Мелколиственные леса	Дубовые леса	Кедрово-широколиственные леса	$\Delta \Sigma Q_d^* / \Delta \Sigma Q_d^*$
С, 20°	129	5	5	3	3
С, 40°	110	8	8	4	7
Ю, 20°	60	-8	-60	-93	-54
Ю, 40°	16	-38	-313	-370	-204

Примечание. Для горизонтальной поверхности $\Delta \Sigma Q_d = 6,79$ ккал/(см²·мес) (100%).

плитуда ΣQ_d^* на южных крутых открытых склонах составляет всего 1,06 ккал/(см²·мес) (примерно 16% амплитуды ΣQ_d).

Если на этих склонах произрастают среднесомкнутые мелколиственные, дубовые или кедрово-широколиственные леса, то за счет увеличения прихода радиации под полог зимой и резкого его сокращения летом разница между январскими и июньскими ΣQ_d^* (под пологом леса) равна 3—4 ккал/(см²·мес). Это более чем в 3 раза превышает амплитуды на открытом склоне. При этом меняется и знак разности, т. е. увеличение

общего прихода радиации летом к верхней границе РП не компенсирует воздействия самого РП. По мере уменьшения крутизны южных склонов амплитуда годового хода ΣQ_d^* снижается до 93—50% амплитуды ΣQ_d^* , но знак разности сохраняется. Полог темнохвойных лесов значительно нивелирует годовой ход радиации. Но на южные склоны зимой под полог также поступает больше суммарной радиации, чем летом. В этом случае амплитуда ΣQ_d^* равна 0,3—0,4 ккал/(см²·мес), что составляет —8...—38% $\Delta \Sigma Q_d^*$, увеличиваясь на крутых склонах. На северных склонах, независимо от видового состава полога, летом под полог поступает радиации больше, чем зимой. В то же время амплитуда годового хода ΣQ_d^* не превышает 10% амплитуды на открытых склонах.

Таким образом, результирующим действием растительности является уменьшение сезонных контрастов, характерных для северных открытых склонов, и их увеличение по сравнению с обычно наблюдающимся на южных открытых склонах. Можно полагать, что эта особенность радиационного режима южных склонов является чисто региональной и связана со снижением общего прихода радиации во время летнего муссона. В более континентальных районах, очевидно, следует ожидать однонаправленного воздействия РП на годовой ход ΣQ_d^* , аналогичного тому, которое отмечается на северных склонах в условиях Среднего Сихотэ-Алиня.

В течение одного сезона РП сильно нивелирует межэкспозиционные градиенты и различия в приходе радиации к пологим и крутым склонам (табл. 63).

Максимально возможное сокращение пространственных контрастов отмечается в период активной вегетации. Однако темнохвойные леса обуславливают снижение $\Delta \Sigma Q_d^*$ и в зимний период. Если в качестве исходного критерия взять величину межширотного градиента ΣQ_d в интервале $\varphi = 40 \div 45^\circ$ на АТС (соответственно для января 0,26 ккал/(см²·мес), для июня 0,28 ккал/(см²·мес) на 1° широты), то выявляются следующие отношения. Зимой $\Delta \Sigma Q_d^*$ на подстилающей поверхности открытых различно экспонированных склонов превышают этот градиент в несколько десятков раз (особенно крутых склонов), летом — в 4—7 раз. Под пологом леса в середине вегетации $\Delta \Sigma Q_d^*$ соизмеримы с $\Delta \Sigma Q_d$ на 1° широты или даже меньше. В зимний период для открытых крутых склонов и под пологом лиственных лесов межэкспозиционные градиенты еще достаточно велики (примерно в 10—15 раз больше межширотных). Под пологом темнохвойных лесов контрасты в 3 раза меньше, чем $\Delta \Sigma Q_d^*$. Между пологими и крутыми склонами пространственные различия (при одном типе растительности) не превышают межширотный градиент.

Пространственные различия в ΣQ_{λ}^* под пологом среднесомкнутых горных лесов Среднего Сихотэ-Алиня (% от $\Delta \Sigma Q_{\lambda}^*$)

Месяц	$\Delta \Sigma Q_{\lambda}^*$ между открытыми склонами, ккал/(см ² ·мес)	Пихтово-еловые леса	Мелколиственные леса	Дубовые леса	Кедрово-широколиственные леса
-------	---	---------------------	----------------------	--------------	-------------------------------

$\Delta \Sigma Q_{\lambda}^*$ между склонами крутизной 20 и 40° одной экспозиции

Январь	С	0,63 (100)	14,0	39,7	51,0	30,2
	Ю	1,82 (100)	13,7	50,0	24,7	15,4
Июнь	С	1,94 (100)	3,1	3,1	14,4	4,6
	Ю	1,22 (100)	10,6	5,7	27,2	18,0

$\Delta \Sigma Q_{\lambda}^*$ между южными и северными склонами равной крутизны

Январь	20°	5,47 (100)	14,1	54,8	65,4	43,8
	40°	11,98 (100)	9,2	34,7	36,3	24,0
Июнь	20°	0,78 (100)	7,7	11,5	9,0	9,0
	40°	1,50 (100)	8,7	14,7	8,0	12,0

Рассмотренные выше соотношения базируются на типологическом обобщении ландшафтных единиц различных рангов. В целом они отражают гипотетическую схему возможных изменений сумм радиации, так как получены в предположении: 1) постоянной величины C_{Π} и 2) равной вероятности приуроченности лесов различного видового состава к разным склонам.

На рис. 62 представлены данные, в большей степени соответствующие реальной ситуации. При расчете ΣS_{λ}^* (под пологом леса) рассматривались два варианта. Первый — склоны всех экспозиций заняты коренными пихтово-еловыми лесами, второй — производными мелколиственными лесами. В зависимости от экспозиции и крутизны склона учитывалось изменение C_{Π} и при расчетах использовались наиболее вероятные значения этой характеристики [125, 149]. Так, например, для пологих северных склонов наиболее вероятны высокосомкнутые древостои, для крутых юго-западных — низкосомкнутые, для крутых южных наиболее вероятно отсутствие указанных лесов и т. д.

Как видно из приведенных схем, лесная растительность Среднего Сихотэ-Алиня в период активной вегетации значительно нарушает основные закономерности распределения ΣS_{λ}^* (на открытом склоне). На склонах всех экспозиций по мере

увеличения крутизны ΣS_{λ}^* возрастают, что связано с разреженностью древостоев на крутых склонах. Минимум ΣS_{λ}^* формируется на пологих и среднекрутых склонах с северной составляющей, занятых сомкнутыми пихтово-еловыми лесами или их

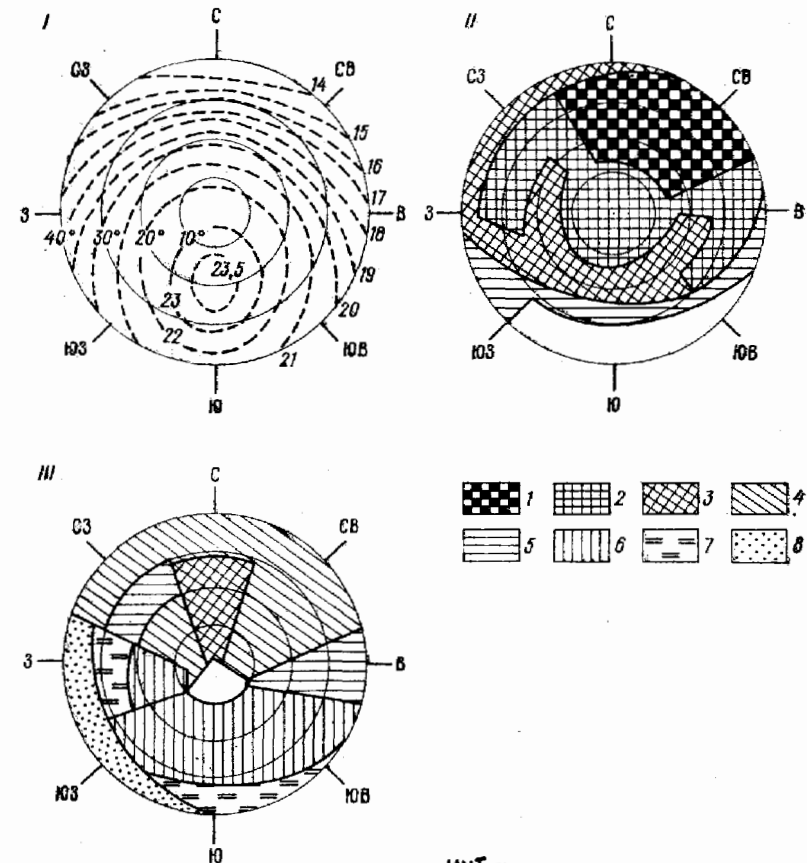


Рис. 62. Распределение сумм прямой ФАР за июль—август на подстилающей поверхности открытых (I) и облесенных склонов при доминировании в древостое *Picea ajanensis*, *Abies nephrolepis* (II), *Betula mandshurica*, *Populus davidiana* (III).

ФАР ΣS_{λ}^* ккал/(см²·период): 0,4—0,6 (1); 0,6—0,8 (2); 0,8—1,0 (3); 1,0—1,5 (4); 1,5—2,0 (5); 2,0—2,5 (6); 2,5—3,0 (7); 3,0—3,5 (8); цифры у кривых (I) — ΣS_{λ}^* ккал/(см²·период).

дереватами. Согласно рассмотренной схеме, максимум ΣS_{λ}^* под пологом пихтово-еловых лесов за 3 летних месяца не превышает 5,4 ккал/см², под пологом мелколиственных — 7,0 ккал/см². Минимумы соответственно равны 0,8 и 1,8 ккал/(см²·период).

Таким образом, даже при наличии относительно сглаженных контрастов между $\sum S_d^*$ в течение лета пространственные различия между $\sum S_d$, примерно в 2 раза меньше. Если в первом случае экстремальные $\Delta \sum S_d^*$ в 5 раз превышают величину межширотного градиента $\sum S_d$ (в интервале $\varphi = 40 \div 45^\circ$), то во втором случае всего в 1,5—1,7 раза.

Следующее приближение гипотетической схемы к реальной ситуации возможно, если учесть при расчете сумм радиации наиболее типичный для разных склонов видовой состав древесного яруса. Для восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня классификация условий местообитания по доминирующему составу коренных лесов была выполнена В. С. Скулкиным [148]. Согласно его данным, темнохвойные леса занимают в основном верхние части крутых склонов с северной составляющей, широколиственно-хвойные — среднекрутые склоны с южной составляющей, широколиственные — пологие склоны тех же экспозиций. Так как эти местообитания являются оптимальными для указанных выше лесов, то C_n древостоя обычно составляет 0,6—0,8. Поэтому представление о возможных изменениях в суммах радиации под пологом при наиболее вероятном распределении коренных лесов можно получить, сопоставив оценки, приведенные в табл. 62 и 63.

Реализуемые в природной обстановке изменения $\sum Q_d^*$ и $\sum Q_d$ характеризуют также данные, приведенные в табл. 64. Выбранные типы леса отражают наиболее распространенные леса в различных высотных поясах Западного Саяна со стороны северного макросклона (1,3) и осевой части Западного Саяна (2) со стороны Араданского хребта.

Таблица 64

Суммарная радиация на открытых склонах и под пологом облесенных северо-восточных склонов крутизной 20° в условиях Западного Саяна (ккал/(см²·период)) (по данным [142, 143])

Тип леса	Н м	$\sum Q_d^*$ на открытых склонах		$\sum Q_d^*$ под пологом леса	
		за VI—VIII	за период с $t_B > 10^\circ C$	за VI—VIII	за период с $t_B > 10^\circ C$
1	1000	36,7	30,6	7,4	5,8
2	1100	36,8	28,1	8,1	5,6
3	1450	36,0	19,8	10,5	5,7

Примечание. Тип леса: 1 — пихтарник чернично-щитовниковый, $C_n = 0,61$; 2 — кедровник бруснично-зеленомошный, $C_n = 0,74$; 3 — пихтарник с кедром чемерицево-кочедыжниковый, $C_n = 0,45$.

Из данных табл. 64 видно, что растительность способствует значительному увеличению вертикальных градиентов $\sum Q_d^*$ (почти в 5 раз выше, чем $\sum Q_d$) в течение летних месяцев. С другой стороны, вертикальные градиенты $\sum Q_d$ за вегетационный период практически сглаживаются для условий под пологом леса. Последнее связано с тем, что снижение $\sum Q_d$, характерное для субальпийского пояса, компенсируется уменьшением плотности полога древесного яруса.

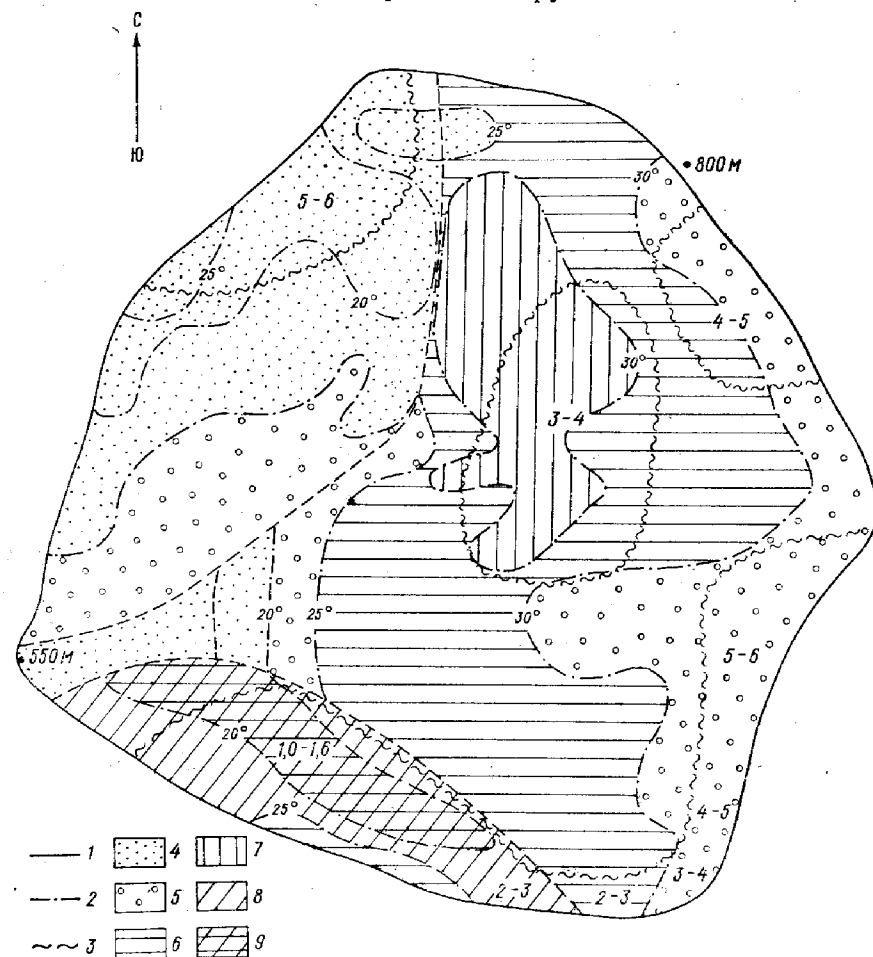


Рис. 63. Распределение сумм прямой радиации за июнь—август в долине первого порядка восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня.

1) границы равных экспозиций, 2) участков с равным углом наклона, 3) участков, занятых лиственными лесами; $\sum S_d^*$ ккал/(см²·период): 4) 17—18, 5) 16—17; 6) 15—16; 7) 14—15; 8) 13—14; 9) <13; внутри контуров даны $\sum S_d^*$.

Реальное распределение ΣS_{λ}^* и $\Sigma S_{\lambda}'$ в пределах одной доли низкого порядка при учете фактического размещения вторичных лиственных лесов и влияния закрытости горизонта иллюстрирует также рис. 63. В принципе подобные карты могут быть построены для ландшафтов различного ранга при наличии топографических и геоботанических карт.

Если сопоставить масштабы трансформации солнечной радиации в гипотетической геосистеме с открытыми склонами и биосистеме, то за счет влияния лесной растительности в последней резко возрастает коэффициент вариации сумм радиации и изменяется средний приход радиации на единицу площади. Например, для биогеосистемы, представленной на рис. 63 (ранг сложного урочища), в летний период имеют место следующие отношения:

	$\Sigma S_{\lambda}^*/\Sigma S_{\lambda}'$	$c_v \Sigma S_{\lambda}'$
Без РП	0,80	0,16
С учетом лесных РП	0,58	0,47

III.4.2. Поглощение радиации деятельным слоем РП

Поглощение радиации всем фитоценозом (или коротковолновый баланс) в двухпоточковом приближении, если потоки перпендикулярны к слою растительности, определяется как

$$B_k = Q_d - R_d, \quad (51)$$

где Q_d и R_d — соответственно радиация, поступившая к верхней границе РП и отраженная от РП.

Для древостоя

$$B_{кдр} = Q_d - R_d - Q_{d1} + R_{d1}, \quad (52)$$

где R_{d1} — радиация, отраженная от нижних растительных ярусов или почвы, Q_{d1} — радиация, поступившая под полог верхних ярусов.

Выражение (52) можно детализировать для сложных РП, учитывая нисходящие и восходящие потоки коротковолновой радиации для каждого яруса [10, 33, 133, 140, 155, 205, 209, 217, 268, 269].

Функция поглощения $\Pi_k = B_k/Q_d$ и ее динамика определяются взаимным изменением альbedo и пропускания. В литературе достаточно подробно рассмотрены вопросы о закономерностях изменения альbedo РП в зависимости от h_{\odot} , соотношения S'/D (или D/Q), оптических свойств отдельных фитоэлементов (в основном за счет варибельности содержания пигментов и

изменения тургора), фенофаз, характеристик сомкнутости, шероховатости полога и т. п. [10, 35, 45, 49, 68, 130, 133, 137, 140, 154, 173, 175, 192, 210, 268, 280, 282]. Поэтому ниже приводим только некоторые данные, которые характеризуют среднее альbedo различных типов растительности.

Так, в области ФАР альbedo самых разнообразных типов РП не превышает 10%. Наиболее низкая отражательная способность (3—5%) типична в летний период для хвойных и особенно темнохвойных лесов. Для лиственных лесов в этот же период альbedo ФАР порядка 4—7%, травяных естественных сообществ — не выше 8%, посевов сельскохозяйственных культур — 4—7%. В силу селективного характера отражения солнечной радиации фитоэлементами альbedo РП в области БИКР существенно выше альbedo ФАР. Это соотношение обуславливает формирование более высокого альbedo в целом для ИНТ радиации и более существенных различий в ИНТ альbedo разных типов растительности. Для хвойных и темнохвойных лесов в течение вегетационного периода также характерны минимальные величины ИНТ альbedo (менее 11—14%). Лиственные леса в середине периода вегетации отражают 16—24% при некотором увеличении альbedo в начале и конце периода в соответствии с темпами нарастания (опадания) листвы и динамикой пигментов.

Различные травостой (в основном из-за меньшей по сравнению с лесом шероховатости поверхности) в среднем отражают несколько больше — до 24—26%.

В безлиственный период различия в альbedo значительно увеличиваются. При отсутствии снега ИНТ альbedo лиственных лесов снижается до 11—23% [140], что обусловлено более низкой отражательной способностью коры стволов и ветвей, а также просвечивающих участков почвы, подстилки и т. п. [10]. В зависимости от наличия, состояния и распределения снега под пологом альbedo резко возрастает: для лиственных лесов до 30—60%, для хвойных — до 15—30% [10, 15, 68, 95, 140, 282 и др.].

Под пологом леса отраженный поток радиации в основном формируется за счет отражения инфракрасной радиации. Поэтому ИНТ альbedo травяной растительности несколько выше, чем на открытых участках и может достигать 30%. В случае редкого травостоя и просвечивания лесной подстилки и почвы величина альbedo под пологом снижается до 7—10%.

Все приведенные выше данные относятся к равнинным сообществам. По данным наших эпизодических наблюдений, в середине периода вегетации среднее ИНТ альbedo травостоя на северном склоне было равно 19%, на южном и западном — 22%. Так как на северном склоне проективное покрытие было ниже по сравнению с южным и западным, трактовать различия

в альbedo как следствие анизотропности отраженной радиации или влияния D/Q весьма затруднительно. По данным [282], для травяных сообществ северного и южного склонов в течение вегетационного периода значимых различий в величине альbedo не наблюдалось¹ ($A=20\div 21\%$). В то же время альbedo дубового леса на южном склоне составляло 19%, на северном — 23%. При этом на южном склоне древостой был более разреженный. В безлиственный период (при отсутствии снега) для открытых участков разных склонов также наблюдалось практически одинаковое альbedo (15—16%), для лесных различия составляли 3% (13—16%).

Сравнение единичных данных об альbedo горных ценозов с обширными материалами для различных подстилающих поверхностей равнинных территорий позволяет предполагать, что влияние типа подстилающей поверхности может иметь более существенное значение, чем характер облученности склонов и анизотропность отраженной радиации. Однако это предположение требует экспериментальной проверки в будущих исследованиях.

Для большинства лесных ценозов P_k остается относительно постоянным в течение вегетационного периода. Эта стабильность обусловлена компенсацией низких величин пропускания при снижении h_{\odot} за счет увеличения альbedo [10, 35 и др.]. Меньше всего варьирует $P_{кдр}$ в области ФАР. В среднем полог древесного яруса темнохвойных лесов поглощает 80—85%, дубовых — 75—80%, светлохвойных — 60—65%, мелколиственных — 70—75% [10, 34, 35, 44, 45, 59, 68, 133, 140, 143, 164, 184, 268, 282 и др.]. Поглощение всего деятельного слоя лес—почва в области ФАР (независимо от видового состава) достигает 90—93%, а максимальное поглощение растительностью практически равно максимальному поглощению листа — 85% [174, 175, 210 и др.]. В ИНТ области снижение P_k в среднем до 75—85% определяется более высокой величиной альbedo.

Роль древостоя в определении P_k связана с видовыми особенностями лесообразующих пород, вертикальной и горизонтальной стратификацией древесного яруса. При неблагоприятных эдафических и климатических условиях, способствующих формированию изреженных древостоев и изменению оптических свойств отдельных фитоэлементов, P_k может снижаться в экстремальных ситуациях на 20—30% по сравнению с оптимальными условиями произрастания [10, 35, 45, 57, 59]. Так, например, в равнинных лесостепных дубравах в зависимости от засоления

¹ В рассмотренных примерах альbedo получено при параллельной установке приборов на склонах (с дополнительными экранами для приборов, измеряющих отраженную радиацию).

почв поглощение ИНТ радиации и ФАР P_k изменяется следующим образом¹ [35, 45]:

Возраст древостоя	30	60	225
Темно-серые лесные почвы	79 (93)	78 (91)	77 (89)
Солонцы	72 (84)	70 (80)	65 (76)

Вечнозеленые хвойные древостой поглощают в течение года примерно равную долю приходящей радиации. Так, для темнохвойных лесов Сибири P_k ИНТ радиации в течение вегетационного периода равно 88—92%, в зимний период — 74—82% [68]. Наличие хвойных пород в составе листопадных лесов может способствовать также сезонной стабильности P_k [10], а листопадных пород в составе хвойных лесов — ее нарушению.

В горных лесах, так же как и в равнинных, при ухудшении условий произрастания P_k и $P_{кдр}$ снижается соответственно с увеличением пропускания радиации. Как видно из данных табл. 65, в субальпийском пихтарнике P_k и $P_{кдр}$ в 1,5—2 раза ниже, чем в темнохвойных лесах горно-таежного пояса. Резкое снижение $B_{кдр}$ в этом случае является следствием как низких значений C_p , так и общего уменьшения прихода радиации в течение вегетационного периода. При этом вертикальные градиенты коротковолнового баланса почти в 10 раз превышают вертикальные градиенты ΣQ_d .

Таблица 65

Поглощение радиаций в темнохвойных лесах Западного Саяна на северо-восточных склонах крутизной 20° (ккал/(см² · период))

Тип леса	H м	ИНТ радиация				ФАР	
		VI—VIII		период с $t_v > 10^\circ C$		VI—VIII	период с $t_v > 10^\circ C$
		B_k	$B_{кдр}$	B_k	$B_{кдр}$	B_k	$B_{кдр}$
1	1000	24,1	16,7	20,0	14,2	16,2	13,5
2	1100	24,9	16,7	19,1	14,5	17,1	13,2
3	1450	18,7	8,2	10,1	4,4	15,1	8,2

Примечание. Тип леса см. табл. 64.

¹ В скобках приведено поглощение ФАР.

Для рассмотренных выше дубовых древостоев различия в P_k между северным и южным склонами в Аппалачах [282] за вегетационный период составляли всего 4% (северный склон 77%, южный 81%). Причем вследствие равенства a_Q величины P_k также различались на 4%; P_k травяных сообществ для ИНТ радиации на обоих склонах было равно 80%.

В предыдущих главах было показано, что при фиксированном приходе радиации пропускание в горных лесах для древостоев одного видового состава в основном определяется величинами C_n и a_n . Принимая это и допуская, что альбеда также в большей степени обусловлено типом подстилающей поверхности, чем рельефом, можно оценить изменение B_k и $B_{k_{др}}$ для горных РП. В принципе эта задача не представляет особого интереса, ибо общие тенденции очевидны и из результатов, приведенных в п. III. 2.— III. 4. Интереснее сравнить потенциальные изменения энергоресурсов, которые возможны на одних местобитаниях при смене растительного компонента горных биогеосистем в результате антропогенного воздействия.

Для решения этой задачи исходными данными являются (помимо данных о приходе радиации и функциях поглощения) данные о наиболее характерных эндодинамических и экзодинамических сукцессионных сменах [153] и соответствующих изменениях C_n для различных склонов [97, 125, 148, 149].

Подробно анализ возможных изменений энергоресурсов биогеосистем был проведен нами для Приморского края в связи с разработкой методических вопросов составления географического прогноза изменения природной среды в результате хозяйственной деятельности человека [125]. Для иллюстрации в табл. 66 приводится решение прогностической задачи на ха-

Таблица 66

Суммы ФАР за вегетационный период под пологом и поглощенной древесным ярусом в лесах группы ассоциаций пихтово-еловой зеленомошной кустарниково-травяной (а) и белоберезняков мезофильно-травяных (б). Восточный склон Среднего Сихотэ-Алиня

A_c B_c	C_n древесного яруса		ФАР под пологом, ккал/(см ² ·период)		$\frac{b}{a}$ %	ФАР, поглощенная древесным ярусом, ккал/(см ² ·период)		$\frac{b}{a}$ %
	а	б	а	б		а	б	
СВ, 20	0,5—0,6	0,6—0,7	4,2	5,7	136	17,8	14,5	82
СВ, 30	0,5—0,6	0,6—0,7	3,9	5,2	133	16,1	13,2	82
СЗ, 20	0,6—0,7	0,6—0,7	3,1	5,7	183	18,8	14,5	77
СЗ, 30	0,6—0,7	0,6—0,7	2,8	5,2	180	17,0	13,2	77
ЮЗ, 20	0,7—0,8	0,5—0,6	2,5	8,0	320	21,9	14,4	66

рактерном для Приморского края примере экзодинамической смены коренной лесной растительности, представленной группой ассоциаций пихтово-еловых зеленомошных кустарниково-травяных горных лесов, производной стадией лесной растительности — белоберезняками мезофильно-травяными горными. Указанная смена в результате сплошных рубок или пожаров наиболее вероятна на склонах северных экспозиций крутизной 20—30° и менее вероятна на юго-восточных и юго-западных склонах той же крутизны. В табл. 66 представлены суммы ФАР под пологом древесного яруса и поглощенные этим ярусом (в соответствии с наиболее вероятными значениями C_n).

Из данных таблицы видно, что наиболее резкое увеличение радиации под пологом древостоя вероятно на юго-западных склонах. На этих же склонах возможны и наибольшие различия в суммах ФАР, поглощенной древесным ярусом. Разница в энергоресурсах физиологических процессов РП на одном склоне при смене коренных лесов их дериватами (как результат хозяйственной деятельности) в несколько раз превышает межширотный градиент $\sum Q_{дФАР}$ за вегетационный период для горизонтальной поверхности.

В то же время суммы ФАР, поглощенной среднесомкнутым древостоем темнохвойных лесов на северо-восточных склонах крутизной 20° за вегетационный период в условиях Среднего Сихотэ-Алиня, примерно на 30% больше, чем в условиях Западного Саяна. Полог мелколиственных лесов поглощает количество энергии, примерно равное тому, которое поглощает на этих склонах полог среднесомкнутых древостоев темнохвойных сибирских лесов.

Таким образом, если по приходу радиации к верхней границе РП за вегетационный период северный макросклон Западного Саяна и восточный макросклон Среднего Сихотэ-Алиня находятся в близких условиях, то приведенные в табл. 65 и 66 данные свидетельствуют о том, что сам РП способствует формированию более существенных региональных различий в суммах радиации под пологом и поглощенной древостоем. Эти различия при близких значениях C_n могут быть следствием нескольких причин: разным характером соотношений между C_n и a_n для основных лесообразующих пород, разным соотношением S/D , определяющим пропускание и альбеда, влиянием видового состава и фенологического состояния на отражение и пропускание радиации.

III.5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рассмотренных выше результатов, отражающих закономерности трансформации коротковолновой солнечной радиации в горных лесах, очевидна универсальность механизмов взаимодействия радиации и РП, выявленных ранее для лесных и

травяных сообществ равнинных территорий. Сохранение общих законов ослабления нисходящих потоков радиации в разнообразных РП является доказательством адаптированности фитоценозов к режиму радиации в конкретных условиях произрастания, которая достигается через процессы саморегуляции структуры на различных иерархических уровнях в ценозе. Этот же результат доказывает ведущую роль структуры в определении радиационного режима РП.

Формирование достаточно близких значений функций пропускания и поглощения в лесах различных местообитаний, но при доминировании одной лесообразующей породы и относительно равной прозрачности полого обусловлено определяющей ролью просветов. Это связано как с малой межвидовой изменчивостью оптических свойств отдельных фитоэлементов, так и со способностью листа (хвои) поглощать практически максимально возможное для него количество радиации.

Независимо от приуроченности горных лесов к различным склонам выявляется общая тенденция увеличения пропускания по мере возрастания h_0 . Только в низкосомкнутых древостоях и на крутых склонах динамика пропускания и поглощения в большей степени зависит от ориентации склона по отношению к падающим солнечным лучам.

Анализ пространственно-временной структуры радиационного поля показал, что эмпирические функции распределения a_Q в большинстве случаев соответствуют теоретическим функциям распределения Пирсона I типа. Это справедливо как для равнинных, так и для горных лесов. Таким образом, более детальное изучение статистического характера радиационного поля подтверждает наличие общих механизмов формирования радиационного режима РП как в среде с характерной статистической структурой распределения фитоэлементов (от особи до листа). Именно преобладание в природных условиях РП с итоговой случайной структурой полого определяет возможность использования достаточно простых экспоненциальных зависимостей для аппроксимации средних эмпирических функций пропускания радиации. В то же время учет при аппроксимации наблюдаемого в природе регулярного типа размещения позволяет для конкретных РП (или ярусов) достичь лучшей сходимости расчетных и фактических значений функций пропускания. Можно полагать, что ослабление радиации в горных РП с групповым типом размещения, характерным для экстремальных условий произрастания (крутые склоны, верхняя граница распространения лесов, склоны с частыми сходами лавин, селей или подверженные пожарам и т. п.), будет происходить подобно тому, как это наблюдается в посевах или равнинных лесах с явно выраженной неоднородной пространственной структурой.

При отсутствии принципиальных различий в характере трансформации радиации специфика радиационного режима горных лесов заключается в следующем. Во-первых, в горных условиях создаются пространственные различия в приходе радиации к РП (и поглощенной ими), произрастающим на разных склонах одной долины, в десятки и сотни раз превышающие различия для равнинных РП, удаленных друг от друга на аналогичное расстояние. Во-вторых, возникает асимметрия дневного и сезонного хода абсолютных величин радиации под пологом. Степень проявления этой асимметрии зависит от ориентации склона и прозрачности полого. При этом (так же как и в равнинных ценозах) групповой тип размещения является типом структуры, наиболее сильно влияющим на особенности временной изменчивости радиации под пологом.

Выявленные закономерности трансформации коротковолновой солнечной радиации в горных лесах представляют интерес в двух аспектах: во-первых, исходя из основных задач современной фитоактинометрии и вопросов структурно-функциональной организации биогеоценозов [117, 137, 153, 154, 184], во-вторых, с позиций радиационной климатологии, микроклиматологии и прежде всего исходя из актуальности исследований влияния лесной растительности на радиационный режим в различных физико-географических районах [23], а также на энерго- и массообмен в системе атмосфера—растительность—почва.

В п. III.4 были даны количественные оценки климатообразующей роли лесной растительности в плане ослабления общего прихода радиации к подстилающей поверхности склонов, принципиального влияния на пространственные контрасты радиационных условий, вертикальные градиенты радиации и т. п. Акцент на лесные ценозы определялся актуальностью фитоактинометрических исследований в типах РП, имеющих наиболее важное хозяйственное значение.

Однако в горных районах, помимо лесной растительности, распространены травяно-кустарниковые сообщества, а также поверхности, лишённые растительности (осыпи, курумы, ледники и т. п.). В лесном поясе травяно-кустарниковая растительность обычно представляет пионерные стадии сукцессий на месте сплошных рубок, пожаров или схода лавин и селей. Каменистая подстилающая поверхность наиболее характерна для крутых склонов и высокогорий.

Оценки прихода радиации, приведенные в главе I, помимо условий на верхней границе РП (лесных или травяно-кустарниковых), характеризуют также радиационные условия подстилающей поверхности, лишённой растительности, в главе III — условия под пологом леса. Так как сомкнутый травостой или заросли кустарника по уровню пропускания в середине периода вегетации близки к лесным РП (см., например, [49, 70, 133]), то на поверхности почвы приход радиации мало различается

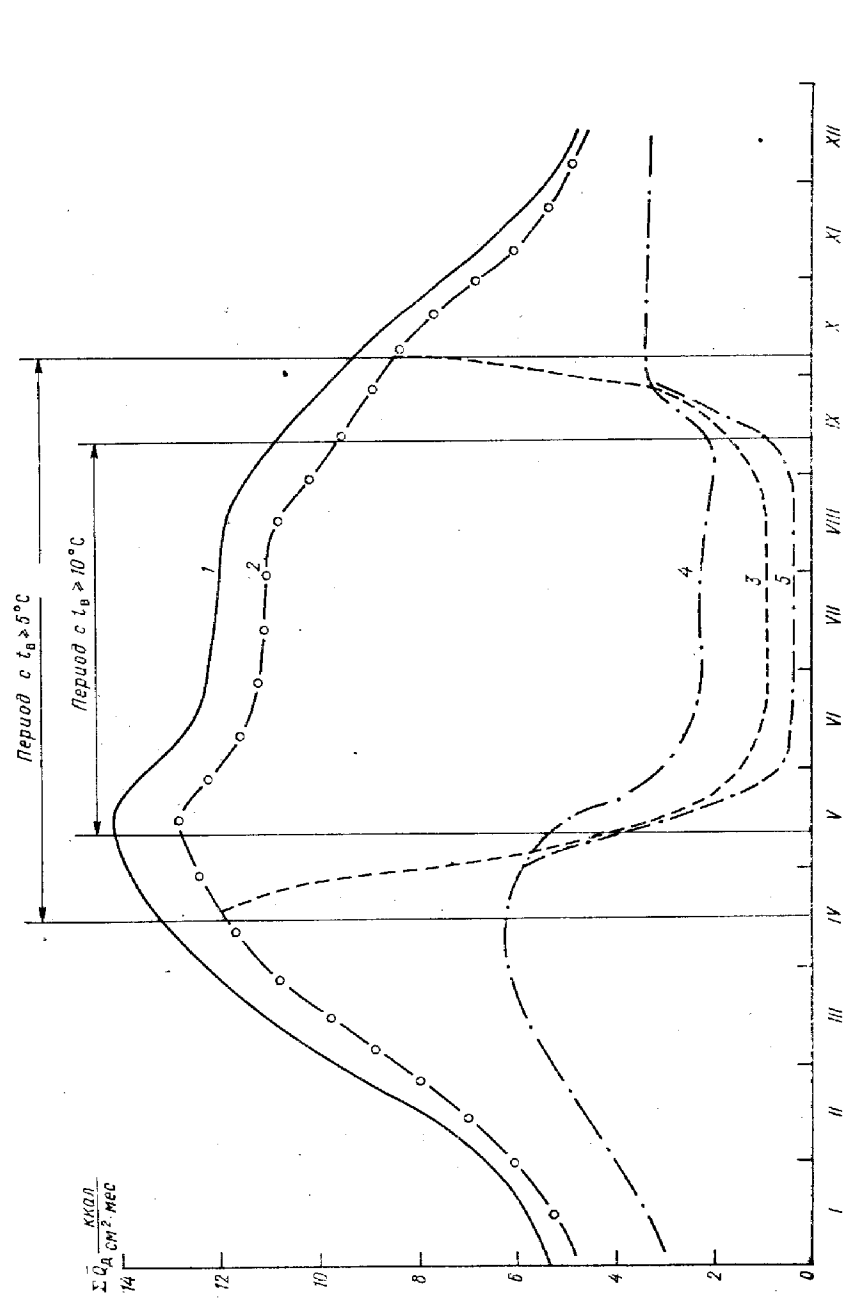


Рис. 64. Годовой ход суммарной радиации при средних многолетних условиях облачности в Среднем Сихотэ-Алине.
 1 — горизонтальная поверхность; западный склон 30° ; 2 — открытый, 3 — под пологом травяно-кустарниковой растительности, 4 — под пологом дубового древостоя, 5 — под пологом верхних и нижних ярусов дубового леса.

для разных типов РП. Это сходство сохраняется только в период активной вегетации. Однако и при близких значениях пропускания и поглощения распределение радиации внутри полога травостоя и лесного ценоза может различаться. Причиной этого являются прежде всего особенности вертикального профиля суммарной площади фитоэлементов, соотношение площади поверхности вегетирующих и невегетирующих фракций, распределение и размеры просветов [49, 110, 115, 133, 186, 212, 225, 226, 250 и др.]. Но основная специфика травяных и лесных сообществ заключается в различной сезонной динамике радиационного режима. Эта динамика определяется фенологическими ритмами развития видов, образующих разные фитоценозы (см., например, [266]). Последнее положение иллюстрирует рис. 64.

В приведенном примере годовая амплитуда ΣQ_d^* на уровне подстилающей поверхности меняется в зависимости от типа РП. Если разность между годовым максимумом и минимумом ΣQ_d на горизонтальной поверхности принять за 100 %, то влияние западной ориентации и склона крутизной 30° приводит к снижению годовой амплитуды ΣQ_d^* до 89 %. Наличие на конкретном склоне дубового древостоя способствует снижению $\Delta \Sigma Q_d^*$ до 39 %, дубового леса (с учетом всех ярусов) — до 60 %. В случае произрастания на этом склоне травяно-кустарниковой растительности годовая амплитуда увеличивается до 116 %. Эти цифры убедительно доказывают значение даже листопадных лесов для сглаживания годового хода приходящей радиации на поверхности открытых склонов¹.

Очевидно, что различия в приходе радиации к поверхности открытых, облесенных и занятых травостоями склонов, особенно в переходные и зимний периоды года, являются первопричиной, вызывающей дальнейшие изменения полного радиационного и водно-теплового баланса, почвообразовательных и продукционных процессов. В микроклиматологической литературе содержится огромное количество информации об изменении термического режима почвы, приземного слоя воздуха, режима снеготаяния, составляющих водно-теплового баланса и т. п. под влиянием растительности в равнинных условиях разных физико-географических районов (см., например, [94, 95, 111, 118, 133]). Не останавливаясь подробно на этих вопросах, обратим внимание только на некоторые аспекты, во-первых, отражающие разницу во влиянии лесной и травяной растительности, и, во-вторых, характеризующие специфику горных территорий.

В последние годы опубликован ряд данных, свидетельствующих о разнице в величинах полного радиационного баланса $B_{г.л}$

¹ Хотя значение относительной амплитуды годового хода может в отдельных случаях (особенно на южных склонах) и усугубляться при наличии лесных РП (см. табл. 62).

лесных и травяных РП [68, 118, 133, 140, 184 и др.]. При равном приходе Q_d и тепловой радиации к верхней границе РП эта разница обусловлена различиями в альbedo и длинноволнового излучения подстилающей поверхности. Так, по данным Ю. Л. Раунера [133], отношение годовых сумм радиационного баланса для лесопокрытых территорий $\sum B_{л}$ и участков с травяной растительностью $\sum B_{тр}$ в зоне 46—60° с. ш. для лиственных лесов составляет 1,25—1,27, для хвойных — 1,31—1,37. Для темнохвойных лесов Восточной Сибири за год $\sum B_{л}/\sum B_{тр}$ равно 1,55—1,60, за вегетационный период — 1,15—1,20 [68]; для сосновых лесов в районе Якутска за год $\sum B_{л}/\sum B_{тр} = 1,62$; для лиственного (района Игарки) 1,37 [118]. В целом для равнинных лесопокрытых территорий суши Земли радиационный баланс на 26 % выше, чем для посевов, на 43 % выше, чем для пастбищной растительности, и в 2 раза больше, чем для оголенной почвы [184].

Из приведенных выше значений $\sum B_{л}/\sum B_{тр}$ и других литературных данных следует, что, во-первых, для хвойных лесов это отношение больше, чем для лиственных, и, во-вторых, в условиях севера ЕТС и Сибири наблюдается увеличение разности между $B_{л}$ и $B_{тр}$. Первая особенность обусловлена прежде всего возрастанием $B_{к}$ в хвойных лесах. Это подтверждается немногочисленными экспериментальными данными, согласно которым эффективное излучение над темнохвойным лесом в течение лета на 8—10 % меньше, чем над открытыми участками [68]. Вторая особенность изменения $\sum B_{л}/\sum B_{тр}$ является следствием сокращения (на 60—70 дней) периода с отрицательным радиационным балансом над лесом в основном за счет меньшей продолжительности залегания снежного покрова [68, 95]. При этом для вечнозеленых хвойных лесов (и даже листопадных) сохраняется значение роли $\sum B_{к}$ в определении $\sum B_{л}$, но отмечается и возрастание роли $\sum B_{д}$. Последнее особенно заметно весной в период снеготаяния, когда эффективное излучение над темнохвойным лесом на 25 % больше, чем над открытыми участками [68].

Хотя для горных лесов практически отсутствуют экспериментальные данные о соотношении $\sum B_{л}^*/\sum B_{тр}^*$, можно предполагать сохранение общих тенденций, полученных на примере равнинных РП. Реальность этого предположения базируется на том, что эффективное излучение превышает $B_{к}^*$ только в холодный период года. В теплый сезон $B_{к}^*$ восполняет потери радиационного тепла за счет эффективного излучения и является основным предиктором в определении B^* (табл. 67).

Сохранение отношения $\sum B_{л}^*/\sum B_{тр}^*$ для горных лесов подтверждается данными, приведенными в [282]. В этой работе было показано, что на северном склоне годовые $\sum B_{л}^*$ и $\sum B_{тр}^*$

Таблица 67

Составляющие радиационного баланса на северном и южном склонах крутизной 20°. Дубовые леса, Западная Вирджиния, средние данные за ясные дни летнего периода [232] (кал/(см² · мин))

Составляющие	Склон	
	с	ю
$Q_{дл}^*$	1,17	1,40
$A_{л}^{*0/0}$	18,0	18,0
$B_{к,л}^*$	0,95	1,15
$B_{д,л}^*$	-0,10	-0,10
$B_{л}^*$	0,85	1,05

составляют примерно 46—50 % тех же величин на южном склоне (рис. 65). Причем на последнем отрицательные значения $\sum B_{л}^*$ и $\sum B_{тр}^*$ в течение года не наблюдались. В течение лета разность $\sum B_{л}^* - \sum B_{тр}^*$ на северном склоне составляла 40 кал/(см² · сут), на южном — 30 кал/(см² · сут). Отсюда можно говорить о сохранении тенденции, аналогичной изменению $\sum B_{л}^*/\sum B_{тр}^*$ для равнинных лесов в более высоких широтах [133]. Эффективное излучение на обоих склонах над лесом в течение лета было меньше, чем над травяными сообществами. Однако на южном склоне эти различия сглаживались. Зимой соотношение изменялось на обратное, аналогично тому, как оно изменялось для темнохвойных лесов равнинных территорий Сибири. на сев. скл.

Взаимосвязано с изменениями составляющих радиационного баланса и изменение температуры воздуха и подстилающей поверхности [282]. Так, в рассматриваемом примере для открытых участков температура воздуха на южном склоне в утренние часы в течение всего года на 1—2 °C выше, чем на северном. Днем в вегетационный период термические условия на обоих склонах равны, а зимой южный склон также на 1—2 °C теплее. Ночью отмечается большой разброс точек, но в период от марта по декабрь сохраняются более высокие температуры (на 0,5—1 °C) на северном склоне, а в период с января по март южный склон на 1—1,5 °C теплее.

Лесная растительность вносит существенные коррективы в сезонный ход пространственных градиентов температуры воздуха (рис. 65). На северном склоне утром и днем температура

в лесу в среднем выше, чем на открытом склоне, на южном — ниже. Ночью температурные контрасты сглаживаются при сохранении более высокой температуры в лесу в течение зимнего периода. Разброс точек, очевидный из рис. 65, связан прежде всего с влиянием ветра и увлажненности территории. Влияние турбулентного обмена, накладывающегося на различия в инсо-

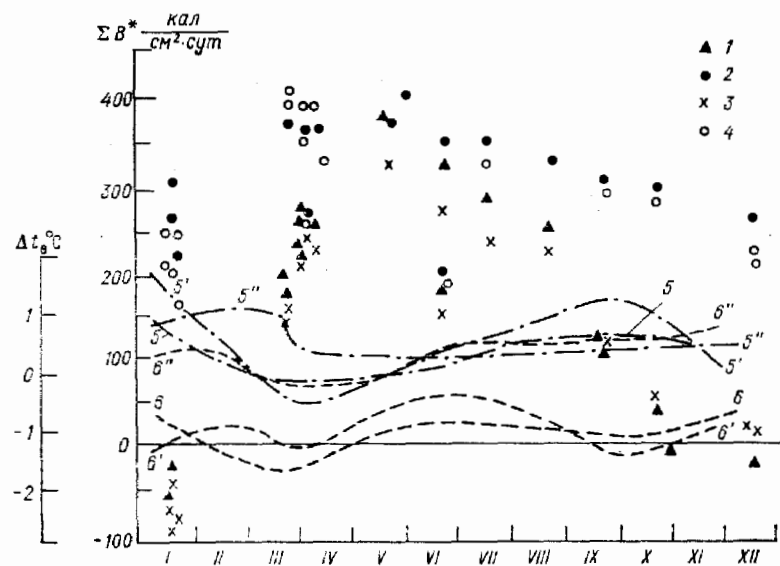


Рис. 65. Годовой ход суточных сумм радиационного баланса над лесом (1, 2) и травостоем (3, 4) и годовой ход различий в температуре воздуха между облесенными и необлесенными участками склонов.

Склон крутизной 37°: 1, 3, 5) северный, 2, 4, 6) южный; 5, 6) утро, 5', 6') день, 5'', 6'') ночь.

лируемости склонов, подтверждается также данными, приведенными в [111], согласно которым разница в температуре воздуха (на высоте 2 м) на северном и южном склонах с травяным покрытием может в отдельные месяцы практически не наблюдаться. Однако распределение повторяемости температур (на примере склонов Среднего Сихотэ-Алиня) указывает на то, что разно экспонированные склоны с одинаковой подстилающей поверхностью характеризуются достоверно различными типами распределения. Эта черта температурного режима справедливо рассматривается в [111] как свидетельство недостаточности средних значений температуры при анализе процессов формирования термических условий в горных районах.

Структура теплового баланса, общие закономерности изменения его составляющих в различных условиях местообитания

и типах равнинных РП рассмотрены во многих работах (см., например, [29, 30, 69, 133, 140, 166, 172, 184, 248]). Для лесных РП сведений меньше, но их сопоставление позволяет получить общее представление о влиянии лесной растительности [133, 140, 182—184, 269, 281 и др.].

В среднем равнинные лиственные леса за вегетационный период расходуют на турбулентный теплообмен P с атмосферой 2—6 % $\Sigma B_{л}$, хвойные — 30—35 %. На теплообмен в деятельном слое, включая почву ($P_{пл}$), расход очень невелик, порядка 1—3 %, и сопоставим с затратами тепла на теплообмен травяных сообществ. В зависимости от типа леса изменяются затраты тепла на испарение LE . Больше всего расход на испарение отмечается в лиственных лесах (92—97 %), который возрастает в увлажненных местообитаниях (например, пойменные леса), елово-пихтовые леса расходуют на испарение 65—68 % $\Sigma B_{л}$. Общие тенденции в изменении структуры теплового баланса (в относительных единицах по сравнению с составляющими баланса для травяных ценозов) очевидны из приведенной таблицы [140]:

Лес	$LE_{л}/LE_{тр}$	$P_{л}/P_{тр}$	$P_{пл}/P_{птр}$
Широколиственный	1,60	0,24	0,67
Мелколиственный	1,42	0,63	3,08
Сосновый	1,34	0,83	2,00
Елово-пихтовый	1,26	1,47	1,80

Подробно вопросы водного баланса лесных и необлесенных равнинных территорий рассмотрены Ю. Л. Раунером [133]. Согласно его исследованиям, различия в величинах суммарного испарения деятельного слоя леса и травостоев связаны как с соотношением $\Sigma B_{л}/\Sigma B_{тр}$ и разницей в поступлении осадков, так и с увеличением транспирации лесного полога. Последнее в свою очередь обусловлено характером изменения площади фитоэлементов, глубиной полога, разницей в продолжительности фенофаз, более мощной корневой системой, позволяющей использовать почвенную влагу на транспирацию. По мере замыкания полога древостоя транспирация снижается и испарение с почвы не компенсирует уменьшения суммарного испарения.

В горных условиях при сохранении одного типа растительности испарение и водный баланс в целом определяются ресурсами тепла, приходом осадков, характером стока и фильтрации, а также конденсацией влаги в горных почвах.

Например, в условиях Приморского края наибольшая величина испарения отмечается на южных склонах при больших величинах $\sum B^*$, наименьшая — на относительно холодных северных [94, 125]. По нашим наблюдениям за 1973—1975 гг., количество осадков, выпавших за летние месяцы на северных склонах в долинах низкого порядка на одной H при наличии коренных широколиственно-хвойных лесов, на 15—20 % больше, чем на безлесных склонах. На южных склонах, занятых травяно-кустарниковой растительностью, было зарегистрировано на 20 % меньше осадков, чем на необлесенных северных. По-видимому, воздействие леса соизмеримо с воздействием ориентации необлесенных склонов по отношению к переносу влагонесущих воздушных масс.

Лес регулирует также количество влаги, поступающей к подстилающей поверхности склона. Так, полог широколиственно-хвойных лесов задерживает в среднем 10—12 % жидких осадков, а при их интенсивности 5—6 мм кронами может быть задержано до 60 % осадков. С другой стороны, при морозящих осадках (≤ 1 мм) и наличии туманной капли полог пропускает практически все осадки.

Следствием различий в увлажнении склонов разной ориентации, занятых разным типом растительности, и в суммарных энергоресурсах являются межсклоновые контрасты влагозапасов. Так, в Приморском крае влагозапас почв южных склонов на 40—45 % меньше влагозапаса почв северных склонов [94]. Под пологом леса влагозапас почв на южных склонах на 28 % больше, чем под травяной растительностью, а на северных склонах подобные различия не превышают 5—7 %. Под травяной растительностью отмечаются наибольшие амплитуды влагозапаса в слое 0—30 см, как следствие динамики осадков и испарения. Причем для южных склонов вообще характерны более значительные колебания влагозапасов, чем для северных.

Однако суммарный эффект рельефа и РП неоднозначен в различных физико-географических условиях. Так, например, в условиях влажного лета в Западной Вирджинии под пологом дубового леса на северном и южном склонах были зарегистрированы очень малые различия во влагозапасах верхнего 45-см слоя почвы.

В течение периодов с осадками на южном склоне при меньшей S_n древостоя влажность почвы была выше, а в сухой период ниже, чем на северном склоне [232]. К сожалению, в литературе вообще мало данных об изменении всех составляющих водного баланса в горных условиях (см., например, [224]), а тем более отражающих воздействия различных типов растительности на фоне топографических факторов.

Представление о возможных масштабах воздействия рельефа и РП на суммарное испарение можно получить из сопоставле-

ния следующих данных. Так, в долинах низкого порядка Приморского края $\sum E_{\text{мес}}$ с поверхности северного склона с травяно-кустарниковой растительностью в среднем за летний период была на 15 мм ниже, чем с южного склона, занятого тем же типом растительности. Эта разница составляла 10 % $\sum E_{\text{мес}}$, наблюдаемого на водоразделе той же долины. В районе Аппалачей при разнице в $\sum B_{\text{л}}^*$ и $\sum B_{\text{тр}}^*$, равной 30 кал/(см²·сут) (южный склон) и 40 кал/(см²·сут) (северный), возможные различия в испарении с лесных и необлесенных склонов одной экспозиции составляют 15 и 21 мм в среднем за летние месяцы (или 90 и 123 мм за теплый сезон). Эти соотношения соизмеримы с контрастами в испарении с открытых склонов [224]. Отсюда очевидно, что в горных условиях сохраняется приращение суммарного испарения лесной растительностью по сравнению с открытыми участками, занятыми травостоем. Причем непосредственное воздействие РП на испарение в рассмотренных примерах по масштабу сопоставимо с воздействием экспозиционного фактора. Несомненно, что этот вывод требует экспериментальной проверки в различных физико-географических районах.

Априори можно полагать, что в горных районах лес, с одной стороны, способствует сглаживанию пространственных контрастов, обусловленных экспозиционными и высотными различиями в приходной части водного баланса, а с другой стороны, усиливает вероятность локальных осадков (особенно в более континентальных условиях). Кроме того, за счет снижения поверхностного стока и большей фильтрации почвенной влаги лес регулирует подземный сток в речные бассейны и т. п.

Но гидрометеорологическая эффективность леса по-разному проявляется в различных физико-географических условиях. Так, например, на ЕТС и в Западной Сибири положительное влияние леса на структуру водного баланса наиболее ощутимо в южных частях лесной и лесостепной зон [133]. В условиях муссонного климата Приморского края на примере долин низкого порядка можно утверждать, что водоохранное значение горных лесов более существенно на южных склонах, так как влагозапасы под лесной и травяной растительностью на северных склонах достаточно стабильны [94]. В целом благоприятное воздействие леса на среду в этом районе подтверждается длительностью процесса восстановления лесной растительности на гарях и сплошных вырубках. Основной причиной этого процесса являются малые влагозапасы в 30-см слое почвы, а также значительные амплитуды влажности и температуры, характерные для местообитаний, занятых вторичными травяно-кустарниковыми сообществами. Отсюда следует, что лесохозяйственные мероприятия на склонах (особенно южных) должны проводиться под постоянным экологическим контролем.

Таким образом, рассмотренные выше отношения свидетельствуют в пользу того, что в горных условиях при наличии пространственных контрастов в приходе радиации реально превышение $\sum B_{\lambda}^*$ над лесными массивами по сравнению с травяно-кустарниковой растительностью. Однако наличие многофакторных сложных связей между РП и атмосферой требует постановки длительных комплексных экспериментов для уточнения роли лесной растительности в определении структуры энерго- и массообмена горных биогеосистем различного масштаба.

Глава IV

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НИЖНИХ ЯРУСОВ ЛЕСНЫХ ЦЕНОЗОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ РАДИАЦИИ

IV.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как было показано в главе III, под пологом верхних ярусов на фоне общего снижения прихода радиации увеличивается пространственно-временная неоднородность радиационного поля. При этом на территории, ограничивающей один фитоценоз, в зависимости от структуры верхних ярусов поступление радиации может варьировать от 0 до 100 % по сравнению с открытым местом. Для верхних ярусов аналогичные колебания наблюдаются на больших территориях (особенно в условиях расчлененного рельефа) или при переменной облачности. Растения нижних ярусов функционируют также при большом диапазоне временных колебаний радиации от низкочастотных (определяемых астрономическими факторами), среднечастотных (связанных с облачностью и передвижением тени) до высокочастотных (доли секунд), обусловленных влиянием ветра и качанием листьев деревьев [10, 36, 59, 133, 137, 163, 164 и др.].

Помимо перечисленных аспектов, под пологом меняется и спектральный состав радиации. Под пологом леса доля ФАР в интегральном потоке много ниже по сравнению с открытым местом, но значительно выше участие инфракрасных лучей [8, 10, 164, 276, 277]. В зависимости от светолюбия растения по-разному реагируют на ослабление радиации под пологом леса и изменение ее спектрального состава. При этом неблагоприятные последствия низкого уровня радиации могут частично компенсироваться хроматической адаптацией растений, как это отмечается у теневыносливых видов, выросших на синем свете.

Оценки оптимальных состояний для растений по какому-либо фактору среды (в том числе и солнечной радиации) в принципе наиболее просто можно выявить в условиях контролируемого опыта. Однако полученные в этом случае результаты не всегда соответствуют реальным ситуациям, поскольку в природной обстановке растение испытывает воздействие множества биогенных и абиогенных факторов и само влияет на среду.

Методы экспериментальной фитоценологии или экофизиологии, основным принципом которых является искусственная изоляция какого-либо фактора или имитация его изменения, пока не нашли широкого распространения. Это связано прежде всего с трудоемкостью методов и необходимостью длительных наблюдений. Кроме того, распространение полученных результатов на другие типы растительных сообществ весьма ограничено. С другой стороны, результаты подобных исследований, раскрывая внутренние механизмы продукционного процесса, крайне полезны при интерпретации данных, полученных более грубыми методами. К числу последних относится и метод сравнительно-пространственного анализа, широко используемый в географических и геоботанических исследованиях [39, 40—42, 51, 53, 54, 65, 127, 130, 148, 149, 167 и др.]. Этот метод позволяет за относительно короткий период охватить максимально возможный диапазон исследуемого явления. Используемые при дальнейшей обработке результатов статистико-информационные меры [32, 96, 128—130] отражают по существу только статистический характер отношений между фактором и явлением (табл. 68, 69).

Таблица 68

Коэффициенты корреляции между массой травяного яруса и характеристиками среды [54]

Характеристика	Пропускание ФАР	Масса подстилки	Состав подстилки	Влажность почвы	Кислотность
Масса травяного яруса	0,47	0,45	0,39	0,34	0,30
Пропускание ФАР	—	0,50	—	0,37	0,39
Масса подстилки	0,76*	—	0,68	0,34	0,32
Состав подстилки	—	0,62*	—	—	0,53
Влажность почвы	0,68*	0,67*	—	—	0,39
Кислотность	—	0,72*	0,59*	0,61*	—

Примечание. Звездочкой (*) отмечены коэффициенты множественной корреляции.

Но если априори известно о природе процесса (например, о непосредственной зависимости продукционных процессов от солнечной радиации), то полученные отношения имеют и содержательный характер.

Таблица 69 иллюстрирует путь выявления отношений между фитомассой и радиацией на основе распределения коэффициентов направления связи s . Значения этих коэффициентов и их расположение в матрице показывают тенденции в изменении массы при различных режимах радиации. В конкретном

Таблица 69

Выявление характера связи между надземной фитомассой травяного яруса и радиацией [54]

Пропускание ФАР (средина класса), %	Масса травяного яруса (средина класса), г/м ²										Объем выборки
	6	15	23	34	50	77	110	≥150			
≤ 0,8	0,500 +2,7	0,250 +2,6	0,200 +1,4	0,167	0,117	0,083	0,017	0,017	0,017 +1,20	0,020 +1,4	12
1,9	0,284 +1,5	0,217 +2,3	0,121 0,121	0,150 0,258 +1,2	0,202 +1,1	0,073	0,024	0,024	0,016 +1,1	0,130 +2,3	60
2,3	0,193 +1,0	0,113 +1,2	0,185 +1,3	0,260 +1,2	0,168 0,202	0,067	0,034	0,034	0,053 +3,8	0,053 +3,8	124
4,2	0,235 +1,3	0,050	0,091	0,202	0,202 +1,1	0,212	0,071	0,071	0,020 +1,4	0,020 +1,4	119
6,3	0,162	0,040	0,077	0,179	0,167	0,205	0,129	0,129	0,130	0,130	99
9,9	0,077	0,102 +1,1	0,129	0,184	0,158	0,184	0,105	0,105	0,053 +3,8	0,053 +3,8	78
14,2	0,105	0,026	0,184 +1,3	0,184	0,158	0,184	0,105	0,105	0,053 +3,8	0,053 +3,8	38
21,3	0,167	0,222 +2,4	0,111	0,222 +1,1	0,111	0,111	0,055	0,055	0,014	0,014	18
≥ 32,0	0,080	0,040	0,160 +1,1	0,200	0,400 +2,2	0,040	0,080	0,080	0,014	0,014	25
$P(a_i)$	0,185	0,094	0,142	0,216	0,180	0,113	0,056	0,056	0,014	0,014	$N = 573$

Примечание. В числителе дроби дана условная вероятность $P(a_i/b_j)$, в знаменателе — коэффициент связи $e = \frac{P(a_i/b_j)}{P(a_i)}$; знаком плюс (+) отмечены значения $e \geq 1$ [96, 128, 129].

примере первый слабо выраженный перегиб наблюдается при низких значениях a_Q (около 6 %) и соответствует граничным условиям между высокоомкнутыми ельниками и типичными условиями, складывающимися под пологом среднесомкнутых сосновых и лиственных древостоев. Второй статистически достоверный перегиб (при a_Q около 20 %) образуется уже при переходе от последних к сообществу лугов.

Увеличение видового разнообразия за счет внедрения луговых видов не влечет за собой приращения продукции, ибо и лесные и луговые виды функционируют не в оптимальных для себя световых условиях. Для лесных видов радиации избыточно много, для луговых — относительно мало. Для последних немаловажное значение имеет и фактор корневой конкуренции с лесной растительностью. При пропуске около 0,20 (и при оптимальных по другим характеристикам среды условиям) в лесных сообществах умеренной зоны травяной ярус формирует продукцию 13—16 т/га (сырой вес) [54]. Подобные величины характерны для лугов и луговых степей [70]. Отсюда можно полагать, что при указанном режиме ФАР в лесах умеренной зоны уже отмечается выход световой кривой продукции травяного яруса в область плато.

При использовании сравнительно-пространственного подхода на примере травяного яруса мелколиственных горных лесов Среднего Сихотэ-Алиня не было выявлено переходной области ФАР со снижением продукции. В этих фитоценозах надземная масса травяного яруса закономерно увеличивается по мере возрастания ФАР. Однако в области $a_{Q_{ФАР}} = 0,15 \div 0,17$ наблюдается приращение массы при неизменяющихся условиях радиации. Аналогичная тенденция выявляется и для кустарникового яруса [65]. Только область стабильных значений сдвинута в сторону более высоких величин радиации ($a_{Q_{ФАР}} = 0,30$). По существу наличие диапазона стабильных $a_{Q_{ФАР}}$ также отражает ситуацию, когда возможно совместное произрастание видов с различными световыми нишами.

В целом если вид функционирует в пределах своей световой (радиационной) ниши, то при прочих равных условиях (влажности почвы, минерального питания, температурного режима и т. п.) по мере увеличения энергоресурсов происходит увеличение надземной фитомассы. При этом общая продукция и оптимум радиации связаны с теневыносливостью вида [83, 102, 103, 117, 134, 154, 164]. Снижение фитомассы нижних ярусов по мере увеличения прихода радиации может наблюдаться либо при неблагоприятных условиях водно-минерального питания и теплового режима в пределах световой ниши, либо в области контакта растительности различных местообитаний (например,

лесной и луговой растительности, разных парцелл в пределах фитоценоза и т. п.).

Рассмотренные выше примеры показывают, что общие выводы, полученные на основе сравнительно-пространственного анализа и статистических оценок, хорошо согласуются с теоретическими представлениями о механизмах продукционных процессов, а также с результатами экспериментальной фитоценологии и физиологических исследований [102, 103, 164, 175 и др.].

IV.2. ВЛИЯНИЕ ФАР НА ПОДРОСТ ХВОЙНЫХ ПОРОД ПОД ПОЛОГОМ ГОРНЫХ ЛЕСОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Проблема возобновления — одна из самых актуальных проблем лесного хозяйства развивающихся горных районов. Но в настоящее время по этим районам практически нет данных об эколого-физиологических свойствах подростя лесобразующих пород, которые могли бы быть научной основой рекомендаций по лесовосстановительным мероприятиям. Подобная ситуация характерна и для района Дальнего Востока. Несмотря на то что вопросы возобновления в горных лесах Дальнего Востока давно и широко обсуждаются в литературе [81, 89, 90, 97, 135 и др.], опубликованные данные преимущественно базируются на результатах лесоводческих и геоботанических исследований. Количественные оценки влияния факторов среды (в том числе и солнечной радиации) на рост и развитие подростя практически отсутствуют. Косвенно о лабильности фотосинтетического аппарата подростя основных лесобразующих пород Дальнего Востока свидетельствует способность подростя к жизнедеятельности как под пологом леса, так и на открытых участках [87, 97, 135 и др.].

Для некоторого восполнения существующего пробела в изученности процессов возобновления в дальневосточных лесах нами были проведены исследования зависимости между приходом ФАР и состоянием подростя под пологом леса. Акцент на изучение подростя под пологом был сделан на основе следующих соображений. Лесное хозяйство горных районов Дальнего Востока в основном ориентируется на сохранение и создание оптимальных условий для развития естественного возобновления под пологом. Это связано, во-первых, с чисто техническими проблемами, возникающими при создании посадок на открытых склонах. Во-вторых, экологическая обстановка открытых склонов не всегда благоприятна для нормального функционирования подростя хвойных пород. Ограничения, по-видимому, формируются не из-за избытка радиации, а из-за особенностей водно-теплового режима поверхностного 30-см слоя почвы на открытых склонах [94, 111]. Именно иссушение этого слоя способствует возникновению в исследуемом районе очень устой-

Средние условия прихода $\Sigma Q_{\text{ФАР}}^*$ за июль—август 1973—1975 гг. для широколиственно-хвойных лесов Среднего Сихотэ-Алиня

Номер пробной площади (см. табл. 32)	A_c, B_c°	1973 г.		1974 г.		1975 г.	
		ккал/(см ² × период)	%	ккал/(см ² × период)	%	ккал/(см ² × период)	%

Открытые склоны

Ю, 20	22,48	100,0	16,88	100,0	19,23	100,0
С, 20	20,53	91,0	15,21	90,2	17,31	90,0

Под пологом на высоте 2 м

19	ССВ, 20	1,83	51,0	1,14	37,0	1,39	39,0
20	С, 15	1,76	49,0	1,12	36,9	1,41	40,0
21	С, 18	2,11	59,0	1,68	54,0	1,92	54,0
22	С, 20	2,07	58,0	1,65	53,0	1,86	52,0
23	Ю, 20	3,58	100,0	3,10	100,0	3,56	100,0

Примечание. Для открытых склонов и под пологом за 100% приняты $\Sigma Q_{\text{ФАР}}^*$ и $\Sigma Q_{\text{ФАР}1}^*$ на южном склоне крутизной 20°.

Подробно результаты фитометрических исследований подроста изложены в работах М. Г. Лебедевой [81, 99], а анализа влияния ФАР на рост и развитие подроста — в нашей совместной работе [51]. Отсылая читателей к этим работам, здесь приведем только наиболее интересные для практики лесного хозяйства результаты.

Теснота связей между длиной $h_{\text{п}}$, диаметром $d_{\text{п}}$ верхушечного побега и ФАР меняется в зависимости от погодных условий текущего и предшествующего года, условий произрастания конкретного биогеоценоза, напряженности ценотических отношений, а также возраста и общей степени развития самого подроста.

Например, в 1975 г. повсеместно отмечалось усиление по сравнению с 1974 г. статистической связи между $d_{\text{п}}$ и приходом радиации. Это явление прежде всего было следствием холодной и влажной погоды 1974 г., неблагоприятной для заложения почки верхушечного побега. В результате недостаточного резерва ассимилятов интенсивность продукционных процессов в 1975 г. в значительной степени определялась сопутствующими

чивых во времени старых гарей или вырубок, занятых пионерными травяно-кустарниковыми сообществами. Восстановление лесной растительности в таких местообитаниях преимущественно идет через участки, близкие к опушкам сохранившихся лесных массивов. Однако и этот процесс может нарушаться пожарами, более частыми на открытых склонах, чем на склонах, занятых коренными широколиственно-хвойными лесами.

Наличие указанной специфики условий местообитаний, определяющей процесс возобновления коренной лесной растительности, подтверждает практическую значимость проведенных нами исследований прихода радиации к подстилающей поверхности открытых и облесенных склонов.

Не имея возможности организовать комплексные эколого-физиологические исследования (подобные тем, которые провела Ю. Л. Цельникер с сотр. [103, 164]), при изучении состояния подроста нами использовались методы сравнительно-пространственного анализа. С этой целью было заложено пять пробных площадей в коренных пихтово-еловых и широколиственно-кедровых лесах на северных и южных среднекрутых склонах (табл. 70).

Таблица 70

Характеристика возобновления хвойных пород под пологом широколиственно-хвойных лесов Среднего Сихотэ-Алиня

Номер пробной площади (см. табл. 32)	Численность возобновления $H_{\text{п}} \leq 2$ м, экз/га	Соотношение пород, %		
		ель аянская	пихта белокорая	кедр корейский
19	3500	45	46	9
20	2800	53	21	26
21	4200	41	54	5
22	2700	17	30	53
23	900	—	24	76

В течение трех вегетационных сезонов на этих площадях измерялись линейные размеры верхушечного побега текущего года и всего растения при полном учете всех особей подроста ели аянской, пихты белокорой, кедра корейского, высота $H_{\text{п}}$ которых не превышала 2 м. Пропускание ФАР определялось регулярно в течение сезона по изложенной в п. III. 1 методике на уровне верхней части кроны растения. По этим данным рассчитывались средние за сезон $\bar{a}_{Q_{\text{ФАР}}}$ в месте произрастания каждой особи для пробной площади в целом, а также суммы радиации под пологом (табл. 71).

росту погодными условиями. Тем более, что сухой и солнечный 1975 г. по режиму увлажнения также был далеко не оптимальным для таких «океанических» пород [135], как ель аянская и пихта белокорая. Следует отметить, что полученные отношения подтверждают характерное для растительных объектов снижение устойчивости (и соответственно усиление зависимости) к изменению какого-либо фактора среды в неблагоприятных условиях произрастания.

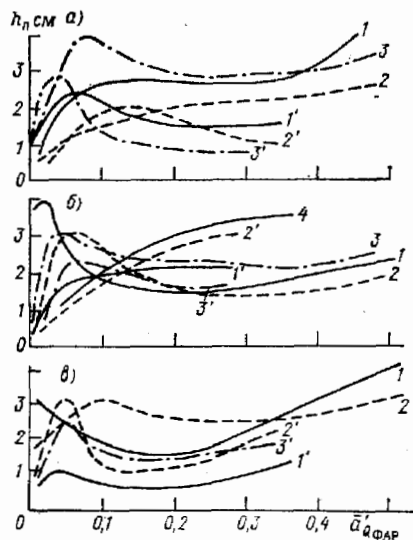


Рис. 66. Изменение длины верхушечного побега $h_{п}$ подроста хвойных пород в зависимости от среднего за вегетационный период пропускания ФАР (средние данные по всем пробным площадям) за 1975 г. (1, 1'), 1974 г. (2, 2'), 1973 г. (3, 3').

1, 2, 3) $H < 70$ см. 1', 2', 3') $H > 70$ см, 4) данные Эмингхана для пихты Дугласа [203]. а) ель аянская, б) пихта белокорая, в) кедр корейский.

При выходе подроста по высоте за пределы травяно-кустарничкового яруса сразу резко возрастает его реакция на изменение радиационных условий. Меры сопряженности между $h_{п}$, $d_{п}$ и ФАР у подроста высотой более 70 см в 2—3 раза больше, чем у мелкого подроста (при одном возрасте особей). Выявленный характер изменения сопряженности свидетельствует о том, что ценотические отношения между подростом, занимающим одну нишу с травяно-кустарничковым ярусом, и растениями этого яруса в большей степени регулируются корневой конкуренцией, чем конкуренцией за световое доминирование.

Приведенные на рис. 66 данные иллюстрируют основные тенденции в изменении $h_{п}$ в зависимости от прихода ФАР, полученные на основе распределения коэффициентов направления связи. Явление этиоляции (удлинения) побегов [102, 165, 175] отмечается у всех трех пород. Причем для пихты (как наиболее теневыносливой породы) область, где наблюдается вытягивание, ограничена самыми низкими значениями радиации $aQ_{ФАР} = 0,01 \div$

$\div 0,03$. Для ели эта область лежит в пределах 0,03—0,08 и для кедра — в пределах 0,04—0,10. Диапазон $aQ_{ФАР} < 0,10$ является по сути «стрессовым» [165], в котором при общем низком балансе органического вещества, сокращении расходов ассимилятов на рост листьев, снижении роста побега в толщину и т. п. происходит увеличение роста в высоту. Последнее свойство является приспособительной реакцией растений к крайне неблагоприятным радиационным условиям. Эта реакция способствует выживанию растений, так как при интенсивном увеличении $h_{п}$ растения способны выйти за пределы затеняющего яруса.

В области $aQ_{ФАР} > 0,40$ величина $h_{п}$ относительно постоянна. В некоторых случаях наблюдается даже ее снижение, очевидно, из-за того, что фотосинтетический аппарат хвои работает еще по теневому типу. При более высоких значениях радиации (что соответствует «окновым» ситуациям) $h_{п}$ увеличивается. Это свидетельствует о лабильности фотосинтетического аппарата хвои, более явно выраженной у подроста кедра и ели.

На возможную перестройку типа световых кривых газообмена при возрастании прихода радиации указывают также данные Эмингхана [203] об изменении $h_{п}$ у молодых деревьев пихты Дугласа, полученные в условиях посадок (кривая 4 на рис. 66).

Из вида функции $h_{п} = f(aQ_{ФАР})$ при $aQ_{ФАР} > 0,30 \div 0,40$ следует, что высокие значения радиации не лимитируют рост в высоту естественного возобновления, вышедшего из-под полога в результате рубок или пожаров.

Независимо от изменения тесноты связи между $d_{п}$ и ФАР при разных погодных условиях и условиях местообитания характер связи сохраняется (рис. 67). У всех пород наблюдается увеличение $d_{п}$ при более высоких значениях ФАР. Эта тенденция выявляется при сравнении различных местообитаний как в течение одного сезона, так и сезонов, отличающихся по приходу радиации. Наиболее отчетливо реакция на изменение ФАР

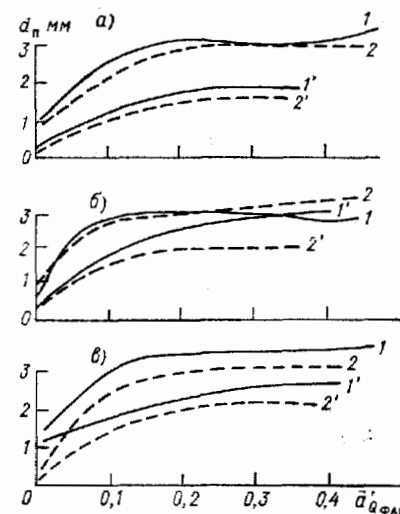


Рис. 67. Изменение диаметра верхушечного побега $d_{п}$ подроста хвойных пород в зависимости от среднего за вегетационный период пропускания ФАР (средние данные по всем пробным площадям).

Усл. обозначения см. рис. 66.

выражена у кедра. Последнее подтверждает большее по сравнению с елью и пихтой светолюбие этой породы.

Функция $d_{\pi} = f(a_{Q_{\text{ФАР}}})$ является более объективной характеристикой зависимости продукционных процессов от режима солнечной радиации, так как снимается ложный оптимум — диапазон этиоляции, который характерен для $h_{\pi} = f(a_{Q_{\text{ФАР}}})$. Поэтому на основании данных об изменении d_{π} можно судить о количестве ФАР, необходимом для обеспечения оптимальных радиационных условий формирования прироста подроста под пологом.

Так, например, у ели (рис. 67) увеличение d_{π} прироста высотой более 70 см происходит при $a_{Q_{\text{ФАР}}} > 0,15$, менее 70 см — при $a_{Q_{\text{ФАР}}} > 0,30$. Этим уровням пропускания на северных склонах соответствуют суммы ФАР за вегетационный период 3,6 и 6,4 ккал/см² и т. д. Можно предполагать, что значения критического уровня радиации в абсолютных единицах должны быть относительно постоянными для породы. Отсюда через суммы ФАР на открытых склонах и $a_{Q_{\text{ФАР}}} = f(C_{\pi})$ можно определить необходимую величину C_{π} , при которой к нижним ярусам поступает радиации больше (или равно) критического уровня (табл. 72).

Изменение критического значения радиации для пихты, ели и кедра отражает теневыносливость этих пород. У пихты, как наиболее теневыносливой породы, критическая сумма ФАР минимальная — 2,7 ккал/(см² · вег. период), у подроста кедра выше 70 см — максимальная — 4,5 ккал/(см² · вег. период). Так как в рассмотренных типах леса может одновременно происходить возобновление всех трех пород, то требования к C_{π} могут варьировать в зависимости от направленности лесохозяйственных мероприятий. Например, для хорошего развития возобновления пихты достаточно, чтобы C_{π} было порядка 0,7, для ели 0,5—0,6 и для кедра 0,4—0,6 (табл. 72).

Полученные для кедра изменения C_{π} с учетом прихода радиации близки к оценкам К. П. Соловьева (цит. по [51]), который считает, что наиболее благоприятные условия для возобновления этой породы складываются в кедрово-широколиственных лесах при $C_{\pi} = 0,3 \div 0,5$.

Из приведенных в табл. 72 данных следует, что при составлении рекомендаций для горных лесов по сохранению определенной C_{π} древесного яруса при рубках необходимо учитывать конкретные характеристики склона (экспозицию и крутизну). Целесообразнее в рекомендациях по рубкам использовать оценки, полученные для подроста, по высоте вышедшего из травяного яруса ($H_{\pi} \geq 70$ см). Это объясняется тем, что освещение полога всегда сопровождается интенсивным развитием кустарниково-травяного яруса и подлеска. В результате напряженность конкурентных отношений значительно возрастает, что

Таблица 72

Сомнительность полога крон древесного яруса в широколиственно-кедровых, елово-пихтовых и кедрово-еловых лесах, при которой формируются благоприятные условия по ФАР для развития естественного возобновления [51]

Порода	H_{π}	ФАР ккал/(см ² × Хвег. пе- риод)	A_c	R_c°	C_{π}	Порода	H_{π}	ФАР ккал/(см ² × Хвег. пе- риод)	A_c	R_c°	C_{π}
Ель	≤ 70 см	3,6	C, СВ, СЗ В, З Ю, ЮВ, ЮЗ	0-20 0-30 0-40	$\leq 0,6$	Кедр	≤ 70 см	4,5	C, СВ, СЗ В, З Ю, ЮВ, ЮЗ	0-10 0-20 0-40	0,5—0,6
Ель	> 70 см	6,4	C, СВ, СЗ В, З Ю, ЮВ, ЮЗ	20-30 30-40 40	0,5—0,6 < 0,5		> 70 см		C, СВ, СЗ В, З Ю, ЮВ, ЮЗ	10-20 10-30 20-40 30-40	0,5
Пихта	> 70 см ¹		C, СВ, СЗ В, З	0-30 0-10	$\leq 0,5$	Пихта	≤ 70 см	2,7	C, СВ, СЗ	20-30 30-40	0,4—0,5
Кедр	> 70 см		C, СВ, СЗ ЮВ, ЮЗ Ю	0-20 10-30 20-40 30-40	0,4		> 70 см		C, СВ, СЗ В, З Ю, ЮВ, ЮЗ	40 0-10 10-40 0-40 0-30 0-20	0,4 0,7—0,8
			C, СВ, СЗ В, З	20-40 30-40	0,3—0,4 < 0,3				ВЗ C, СВ, СЗ	30-40 20-40	0,6—0,7

¹ Если предположить возможную перестройку фотосинтетического аппарата хвои пихты на световой тип.

отрицательно сказывается на росте и развитии, особенно мелкого подроста.

* * *

Приведенные оценки можно использовать в практике лесного хозяйства при составлении рекомендаций по рубкам ухода, при проведении лесовосстановительных мероприятий на территории юга Приморского края.

Однако желательна дальнейшая проверка полученных отношений в более точных эколого-физиологических экспериментах на базе изучения световых кривых газообмена подроста темнохвойных пород Дальнего Востока в различных условиях произрастания. Очевидно также, что в возобновлении хвойных пород огромное значение, помимо светового режима, имеет режим водно-минерального питания, а также конкуренция со стороны материнского полога. И недаром во многих случаях возобновление очень тесно связано со старым валежом древесных пород, где конкуренция, борьба за питание со стороны как материнского полога, так и травяного яруса ослаблена. Но в настоящее время у лесоводов в арсенале активных мер воздействия на жизнь леса практически нет других средств, кроме целенаправленной регуляции радиационного режима через различного типа рубки.

Глава V

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЮ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

V.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При исследовании взаимоотношений между РП и солнечной энергией обычно останавливаются на этапе изучения процессов внутри сообщества, т. е. рассматривают причинно-следственные связи между структурно-функциональными особенностями РП и трансформацией потоков радиации. При этом за отправную точку принимают поступление энергии к верхней границе РП и оптические свойства верхнего яруса, которые в основном определяются видовым составом и пространственной структурой господствующего яруса.

Связаны ли эти характеристики РП с радиационными факторами климата, в том числе и с условиями прихода радиации к верхней границе РП? Очевидно, что оценка солнечной радиации как фактора, определяющего видовое разнообразие современной растительности, является достаточно сложной задачей. Сложность прежде всего обусловлена тем, что современный РП есть результат длительной эволюции, в ходе которой растения адаптировались к условиям внешней среды. Априори можно полагать, что число узкоспециализированных видов (среди растений эдификаторов) должно быть ограниченным. В противном случае РП был бы крайне неустойчивой системой (особенно при низком видовом разнообразии), подверженной изменениям при колебаниях какого-либо фактора среды. Примером таких неустойчивых во времени и пространстве структур являются пионерные сообщества [97, 117, 134, 153].

Тенденция к узкой специализации видов наблюдается в сложных климатических [153] сообществах, когда упорядочение их структуры происходит за счет заполнения видами экологических микронш. Данные эколого-физиологических исследований [134, 164, 175 и др.] указывают на то, что адаптация растений в ходе эволюции вслед за изменениями среды шла преимущественно в направлении стабилизации лабильности фотосинтетического аппарата. Это способствовало возможности произрастания одного и того же вида при достаточно широкой

амплитуде изменения факторов среды. Наличие больших экологических ниш у современных растений подтверждается также опытом интродукции растений. С другой стороны, если бы не было выборочной чувствительности у видов по отношению к различным факторам (т. е. относительной изолированности видов в экологическом пространстве), нельзя было бы объяснить устойчивость РП на уровне высоких таксономических рангов (биомов, групп, формаций и т. п.).

На современном этапе эволюции взаимоотношения между растениями и средой определяются комплексом параметров и прежде всего соотношением тепла и влаги [29, 62, 69, 70, 133, 143, 167, 182—184, 205, 208, 225, 232, 286, 287]. Это находит свое отражение в географическом законе периодической зональности растительного покрова Земли [69]. Естественно, что при изучении природных процессов мы чаще всего сталкиваемся с опосредствованным влиянием солнечной радиации. Означает ли это бессмысленность попыток поиска непосредственного воздействия радиации на растительность (подразумевая исследования эколого-географического плана)? Очевидно, нет. Но при проведении подобных исследований необходимо сопряженное изучение влияния и других факторов хотя бы на качественном уровне. Так как в природной обстановке трудно в чистом виде выделить роль одного какого-либо фактора среды, то, помимо методов экспериментальной фитоценологии, возможно привлечение сравнительно-пространственного анализа с дальнейшей статистико-вероятностной обработкой данных [32, 96, 128—130].

В этом разделе будет рассмотрено влияние солнечной радиации на видовую структуру древесного яруса на примере горных районов. Выбор последних в качестве объекта обусловлен тем, что именно в горах возможно в пределах относительно небольших территорий охватить наблюдениями разнообразные ситуации, включая и экстремальные. Учет термического режима и условий увлажнения проводился в основном косвенно, через включение в анализ характеристик рельефа. При анализе использовались материалы лесотаксационных и геоботанических описаний (около 10 000 шт.)¹, а также данные о приходе радиации для конкретных условий каждого описания.

В.2. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВИДОВУЮ СОСТАВ ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА

Общие представления о тесноте и характере связи между видовым составом древесного яруса (на уровне жизненной формы) и климатическими факторами для лесной зоны СССР

¹ Лесотаксационные описания для территории Сары-Челекского заповедника были предоставлены Н. И. Виноградовым, геоботанические описания для Западного Саяна — М. И. Поликарповым и Д. И. Назимовой.

были изложены в работе [53]. Более глубоко эти вопросы рассмотрены в работах Ю. Г. Пузаченко и В. С. Скулкина [127, 148]. При анализе в [53, 127] использовались данные 1800 описаний из 280 пунктов и районов наблюдений. Для каждого пункта по климатическим атласам и справочникам выбирались средние многолетние характеристики климата. Из материалов самих описаний были получены данные о мерзлотных условиях (глубина протаивания почвы), механическом составе почвы и мезорельефе.

Как показали результаты оценок мер сопряженности [129], наибольшее значение в определении господства той или иной породы имеет мерзлотный режим почв (табл. 73). Наличие мерзлоты определяет господство лиственницы и лишь в частных случаях допускает возможность формирования лесов другими породами [53, 127].

Таблица 73

Меры сопряженности K между различными факторами и видовой структурой древостоя [53]

Факторы	Сумма температур выше 10 °С	Средняя температура января	Глубина протаивания почвы	Сумма осадков за теплый период	Сумма осадков за холодный период	ГТК Селянинова	Рельеф
K	0,140	0,200	0,350	0,150	0,160	0,140	0,070

Там, где вечная мерзлота отсутствует, ведущую роль играют условия зимы, характеризующиеся средними многолетними температурами января. Остальные климатические факторы имеют примерно равное значение.

На основе распределений коэффициентов направления связи для пород были определены наиболее характерные значения по каждому фактору. При этом допускалось, что параметры независимы или слабо зависимы между собой. Проведенный анализ [53, 127] показал, что:

— в неблагоприятных условиях среды распространены породы с наибольшими синэкологическими нишами;

— в среднем наиболее устойчивыми породами являются те, которые распространены в относительно неблагоприятных условиях термического режима. Причем у наиболее холодоустойчивой лиственницы объем синэкологической ниши по этому фактору наибольший (400 °С);

— не выявлено породы, обладающей максимальной устойчивостью ко всем факторам. В основном наблюдается компенсационный тип отношений, при котором породы с относительно высокой устойчивостью к одному фактору характеризуются относительно низкой устойчивостью к другим факторам, т. е.

подтверждается выборочная чувствительность у видов к различным факторам.

Очевидно, что приведенные выше отношения отражают общие эколого-географические тенденции на уровне рода для биома лесов умеренной зоны. В пределах рода экологические ареалы видов могут существенно варьировать.

Так, например, в отличие от обширного географического ареала ели обыкновенной, распространение ели Шренка ограничено небольшой площадью в пределах Тянь-Шаня и Джунгар-

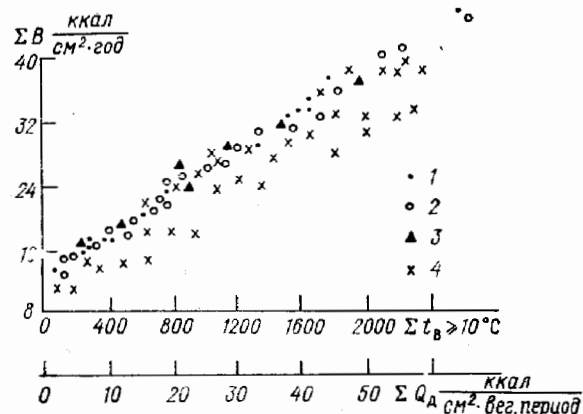


Рис. 68. Зависимость между суммой радиационного баланса за год, суммой температур воздуха выше 10°C (1, 2, 3) и суммой суммарной радиации за вегетационный период (4) в условиях Западного Саяна.

Климатические районы: 1) I и II, 2) III, 3) IV.

ского Алатау [122]. При этом ель Шренка по сравнению с елью обыкновенной занимает более теплую и влажную часть экологического пространства.

В рассмотренных выше примерах тепловой режим характеризуется данными о температуре воздуха. Непосредственно радиационные характеристики климата в анализ не включались. В наших работах и исследованиях Ю. Г. Пузаченко и В. С. Скулкина это делалось из соображений наличия высокой корреляции между термическим и радиационным режимом. Как видно из рис. 68, Σt_b за вегетационный период линейно связаны с годовой ΣB , причем выявляется универсальность этой связи независимо от общей континентальности климата. Между годовыми ΣB и ΣQ_d за вегетационный период также существует линейная зависимость. Большой разброс точек в последнем случае объясняется возможными различиями в расход-

ных частях радиационного баланса при равных условиях прихода радиации.

Имея представление об общей устойчивости распространения господствующих пород к термическому режиму (табл. 73), можно рассматривать экологические ниши пород по радиационному фактору. В этом случае выявленные отношения будут характеризовать требования породы в конкретном диапазоне условий мест произрастания к световому довольствию и их устойчивость по отношению к колебаниям теплового режима.

В.З. РАДИАЦИОННЫЕ НИШИ НЕКОТОРЫХ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД

Рассмотрим на конкретном примере растительности Сары-Челекского заповедника (см. рис. 16) особенности ее пространственного распространения. Исходя из значений мер сопряженности (табл. 74) можно заключить, что солнечная радиация в меньшей степени, чем тип почвы и совместное воздействие высоты и экспозиции, высоты и крутизны, определяет видовую структуру РП. Устойчивость рассматриваемого явления к изменению ΣQ_d связана, очевидно, с высокими суммами радиации, характерными для данного региона, и соответственно с широкими радиационными нишами растений эдификаторов.

Таблица 74

Нормирование меры сопряженности K' между видовой структурой и различными факторами экотопа

Фактор	Тип почвы	H м	A _c	B _c	H и A, H и B _c		ΣQ_d за период вегетации
K'	0,162	0,056	0,051	0,048	0,179	0,160	0,080

Двукратное увеличение K' при сочетании факторов высоты и экспозиции свидетельствует о более важном значении режима атмосферного увлажнения, который в горах Тянь-Шаня определяется высотой и ориентацией склона по отношению к основным направлениям переноса воздушных масс. Существенная зависимость растительности от условий дренажа подтверждается увеличением K' при анализе связей высота и крутизна — растительность.

Достаточно большие меры сопряженности выявлены также при анализе связей между видовым составом РП и эдафическим фактором [39]. Так как сам тип почвы во многом определяется условиями увлажнения и инсоляции (а также формирующей ролью растительности), то косвенное его влияние проявляется в оценках мер сопряженности с высотой над уровнем

моря, экспозицией и крутизной склонов и в характере связи с этими факторами (изложено ниже).

Древесная растительность в диапазоне высот 1000—2500 м наиболее вероятна в поясе $H=1400\div 1800$ м (табл. 75). Незначительное снижение вероятности появления этого типа растительности при $H=1000\div 1400$ м. нельзя рассматривать как результат несоответствия экотопа и растительности. Скорее это следствие смены лесов кустарниковой растительностью при интенсивном выпасе скота и сенокосении. В целом для пояса 1300—2000 м характерны благоприятные природные условия с достаточно высокими $\sum t_{\text{в}} \geq 10^{\circ}\text{C}$ (4000—3000 $^{\circ}\text{C}$) и суммой осадков за летний период 138 мм при среднем значении ГТК за вегетационный период от 2,8 до 2,3 [168]. Луговая и луго-степная растительность становится наиболее типичной в поясе выше 2000 м. В этом же поясе увеличивается вероятность ситуаций с полным отсутствием растительности.

Изменение наиболее вероятного доминанта древесного яруса с высотой происходит в следующем порядке: арча, яблоня, груша, орех — $H=1000\div 1400$ м; орех — $H=1400\div 1800$ м;

Таблица 75

Зависимость между высотой и распространением растительности (коэффициенты направления связи s). Юго-Западный Тянь-Шань

H м	Доминант древесного яруса				
	орех	арча	ель	пихта	яблоня, груша
1000—1400	1,13+	1,87+	0,27		1,47+
1400—1600	1,43+	0,95	0,71	0,52	0,89
1600—1800	1,23+	0,77	0,63	0,58	0,89
1800—2000	0,48	1,17+	1,30+	1,85+	2,37+
2000—2500		0,68	2,39+	3,33+	
N_i	718	133	177	90	34

H м	Растительность			
	кустарниковая	травяная	отсутствие	древесная в целом
1000—1400	1,52+	0,33	0,81	0,98
1400—1600	0,04	0,18	0,48	1,09+
1600—1800	1,01+	0,70	0,85	1,06+
1800—2000	1,02+	1,84+	1,29+	0,88
2000—2500	0,16	3,62+	2,29+	0,65
N_i	238	77	266	1152

Примечание. Знаком плюс (+) отмечены наиболее вероятные ситуации при $s > 1$.

яблоня, груша, пихта, ель, арча — $H=1800\div 2000$ м; пихта, ель — $H=2000\div 2500$ м.

В различных высотных поясах распределение растительности связано с экспозицией¹ и крутизной склона (рис. 69). Так, в поясе 1400—1800 м, где доминируют ореховые леса, они приурочены практически ко всем экспозициям, причем наиболее вероятны на склонах с западными составляющими. На высотах ниже 1400 м орех вероятен и на северных склонах, но наиболее типичная экспозиция — северо-восток и запад. В верхнем поясе орех преобладает на западных склонах. Арча во всех поясах преобладает на склонах южной экспозиции, тяготея к чисто южным только в нижнем высотном поясе. Ель, произрастающая до 1600 м, предпочитает северные склоны, в поясе 1600—1800 м — северо-западные, выше 2000 м она растет на всех склонах с северной составляющей. Пихта полностью отсутствует до $H=1400$ м, выше она (наряду с елью) предпочитает северные и северо-западные склоны. Яблоня до $H=1600$ м вероятна на всех склонах, за исключением северных (наиболее вероятна на юго-западных), выше оптимум для плодовых лесов сохраняется на склонах лишь с южной составляющей, с 2000 м эти леса исчезают.

Отношение отдельных древесных пород к фактору «крутизна склонов» определяется их экологией и прежде всего типом корневой системы и требованием породы к режиму почвенного увлажнения. К сожалению, мы не располагаем данными об этих характеристиках и по аналогии можем предполагать, что увеличение каменистости почв крутых склонов и усиление стоковых процессов должно сопровождаться вытеснением на крутые склоны пород, имеющих поверхностную корневую систему. Кроме того, как было показано в предыдущих главах, крутизна является немаловажным фактором в определении сумм радиации, поступающих к поверхности склонов и, следовательно, тепло- и влагорежима.

Во всех высотных поясах наиболее оптимальные условия для орехово-плодовых лесов складываются на пологих и среднекрутых склонах. В поясе до 1800 м орех доминирует в древесное (рис. 69 б) на склонах до 30°, причем наиболее вероятная ситуация для него — пологие склоны. На верхней границе распространения ореховых лесов они встречаются преимущественно на склонах 20—30°. Арча, располагающаяся до $H=1600$ м, является типичным эдификатором древесного яруса на склонах крутизной $\geq 40^{\circ}$; по мере увеличения высоты арча смещается на менее крутые склоны и в поясе 2000—2500 м эта

¹ Напомним, что в районе исследования восточные склоны в целом холоднее западных, поскольку они подвержены влиянию холодного сибирского воздуха [11, 12, 28, 168]. В то же время наветренные склоны северных и западных ориентаций являются более влажными.

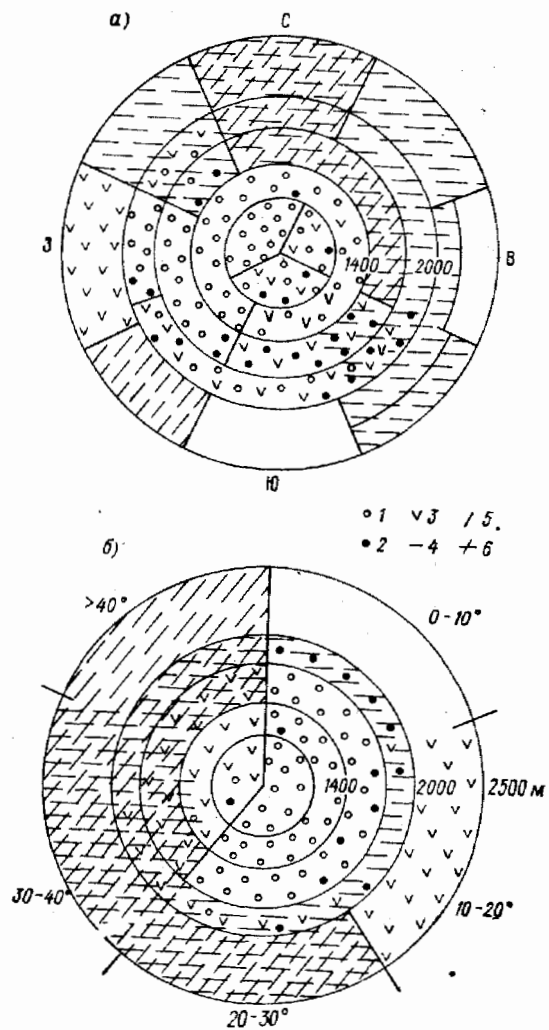


Рис. 69. Распространение основных лесобразующих пород (по наиболее вероятным состояниям при $c > 1$) в условиях Юго-Западного Тянь-Шаня в зависимости от высоты над уровнем моря и экспозиции склона (а) и от высоты над уровнем моря и крутизны склона (б).

1) орех грецкий, 2) яблоня, груша, 3) арча, 4) ель Шренка, 5) пихта Семенова, 6) ель пихта; незаштрихованные участки означают наиболее вероятное отсутствие лесной растительности.

порода наиболее вероятна на склонах 20—30°. Ель во всех высотных поясах тяготеет к склонам крутизной 30—40°; для пихты с ростом высоты предпочтительны более крутые склоны.

На фоне рассмотренных отношений складываются радиационные ниши типов растительности и основных древесных пород (табл. 76).

Таблица 76

Зависимость между ΣQ_d за теплый период и распространением растительности (коэффициенты связи c). Юго-Западный Тянь-Шань

ΣQ_d $\frac{\text{ккал}}{\text{см}^2 \cdot \text{период}}$	Доминант древесного яруса			
	орех	арча	ель	яблоня, груша
50—60	0,28	1,83+	2,81+	—
60,1—70	1,39+	0,34	2,49+	—
70,1—80	1,27+	0,64	1,02+	0,53
80,1—90	0,89	1,25+	0,29	1,68+
>90	1,38+	0,38	—	1,29+

ΣQ_d $\frac{\text{ккал}}{\text{см}^2 \cdot \text{период}}$	Растительность			
	кустарниковая	травяная	отсутствие	древесная
50—60	0,60	0,76	1,27+	1,22+
60,1—70	0,77	0,34	0,27	1,25+
70,1—80	1,13+	0,53	1,09+	0,99
80,1—90	1,02	1,58+	1,21+	0,89
>90	1,45+	0,64	0,43	0,89

Примечание. Общее число случаев $N = 1305$. Знаком плюс (+) отмечены наиболее вероятные ситуации при $c > 1$.

Древесная растительность в целом, встречаясь при всех возможных значениях радиации, является наиболее вероятным типом растительности в диапазоне $\Sigma S_d = 30 \div 50$ и $\Sigma Q_d = 50 \div 70$ ккал/см² за теплый период. Градации $\Sigma S_d = 50 \div 60$ и $\Sigma Q_d = 70 \div 80$ ккал/см² создают переходную ситуацию: наряду с лесом в этих условиях возрастает вероятность появления кустарниковых сообществ. При $\Sigma S_d = 60 \div 70$ и $\Sigma Q_d = 80 \div 90$ ккал/см² наиболее вероятны травяные ценозы при наличии и кустарниковых. С увеличением прихода радиации последние опять становятся наиболее характерным типом растительности.

По степени возрастания требований к энергообеспеченности местопроизрастания лесобразующие породы в регионе Юго-Западного Тянь-Шаня располагаются в следующем порядке: пихта Семенова — ель Тянь-Шаньская и Шренка — арча — орех

грецкий — яблоня, груша (рис. 70). Наиболее «холодные» ниши занимают ель и пихта. При этом их распространение в значительной степени определяется условиями увлажнения. Это оче-

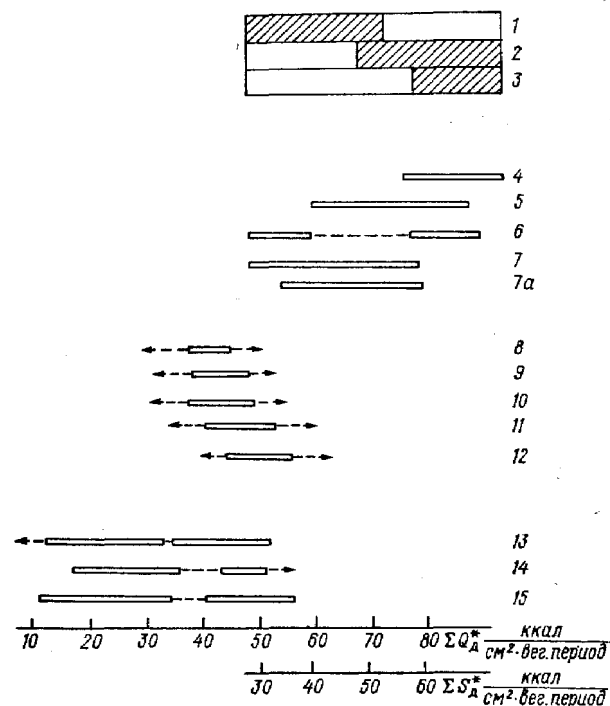


Рис. 70. Радиационные ниши древесной (1), кустарниковой (2), травяной (3) растительности и доминантов древесного яруса (4—15) в условиях Юго-Западного Тянь-Шаня (1—7), восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня (8—12) и Западного Саяна (13—15).

Доминанты: 4) яблоня, груша, 5) орех грецкий, 6) арча, 7) ель тянь-шаньская и Шренка, 7а) ель тянь-шаньская в условиях Северного Тянь-Шаня, по [105], 8) лиственница ольгинская, 9) береза маньчжурская, 10) ель аянская, 11) кедр корейский, 12) дуб монгольский, 13) лиственница сибирская, 14) пихта сибирская, 15) кедр сибирский; штриховкой у 1—3 показаны интервалы ΣQ_d для наиболее вероятного состояния (при $c > 1$).

видно даже из чисто визуальных наблюдений: на больших высотах при общей западной и восточной экспозиции склона древостой из ели и пихты тянутся лентами вдоль микроформ рельефа, развернутых на север или приуроченных к вогнутым формам, т. е. на наветренных склонах или в местах, где возможно скопление запасов влаги (в том числе и снега).

Близкие оценки радиационных ниш для ели Шренка были получены А. Н. Медведевым [105] для Северного Тянь-Шаня.¹ По его данным, оптимальные условия для произрастания ели Шренка формируются на северных склонах крутизной 30° в пределах 2100—2400 м. На высотах 2000—2100 м ельники встречаются на восточных и западных склонах. Редкостойные древостой образуются у верхней границы распространения ели (2600—2800 м) на плоских поверхностях пологих увалов. В виде примеси ель встречается на высоте 1300—1800 м в полосе плодово-лиственных лесов. Перечисленные условия мест произрастания ограничены диапазоном сумм прямой радиации 35—59 ккал/(см²·период).

Как видно из рис. 70, в самой «холодной» части ниши тянь-шаньских лесообразующих пород перекрываются нишами представителей дальневосточной и западносибирской древесной растительности. Среди доминантов темнохвойных горных лесов наиболее «холодные» (или с низкими энергоресурсами) ниши занимают сибирские виды, наиболее «теплые» — среднеазиатские. При удаленности регионов по широте почти на 10° ниши дальневосточных видов перекрываются нишами сибирских и значительно отличаются от таковых для среднеазиатских представителей родов *Picea* и *Abies*. Смещение ниши кедра корейского по сравнению с кедром сибирским в сторону более высоких значений радиации подтверждает большую теплолюбивость первого и существенно более узкое его экологическое пространство. Перекрывание ниш двух представителей рода *Pinus* формируется за счет приуроченности сибирского вида к наиболее «теплым» (и влажным) местообитаниям на северном макросклоне и осевой части Западного Саяна. Лиственница сибирская, наоборот, на северном макросклоне приурочена к более «холодным» местообитаниям, чем на южном.

Разрывы в нишах (рис. 70) указывают на потенциально более широкие диапазоны радиации, при которых может доминировать тот или иной вид. Появление этих разрывов может быть обусловлено двумя причинами. Первая причина — это ограничение распространения определенного доминанта другими факторами среды, в результате чего ниша заполняется более конкурентноспособным в этих условиях видом, т. е. происходит взаимодополняемость видов в экологическом пространстве за счет их выборочной чувствительности к различным факторам. Вторая причина — недостаточная представительность выборки.

¹ На основе сетевых актинометрических наблюдений в Запильском Ала-тау (на высотах 848, 1712 и 2516 м) и трехлетних наблюдений на тех же высотах для северного и южного склонов крутизной 30°.

Это уже вопрос методического характера, но так как по Саянскому и Тянь-Шаньскому регионам использовались предоставленные нам данные геоботанических и лесотаксационных описаний, то проверить истинную причину возникновения разрывов пока не представляется возможным.

Наиболее широкой радиационной нишей обладает лиственница сибирская. Это соответствует результатам, приведенным выше для рода *Larix*. Так как ареал распространения лиственницы сибирской заходит далеко на север, можно полагать, что реальная область ΣQ_d должна быть увеличена за счет низких ΣQ_d . Аналогично для пихты сибирской, встречающейся в качестве доминанта в Кузнецком Алатау, можно предполагать расширение ниши в область более высоких ΣQ_d . Соответственно для пространственных ареалов дальневосточных видов также можно ожидать увеличения диапазона толерантности в ту или иную область радиации.

Таким образом, приведенные выше радиационные ниши отражают приуроченность видов к конкретным регионам и пределы толерантности, соответствующие местным условиям.

Общей чертой для трех регионов является усиление связи между видовым составом и радиацией по мере увеличения континентальности климата. Эта тенденция проявляется как в пределах одной горной области при сравнении наветренных и подветренных склонов (например, для северного макросклона Западного Саяна $K=0,22$, для южного $K=0,30$), так и при сравнении горных областей (Западный Тянь-Шань и Средний Сихотэ-Алинь), расположенных на одной широте, но различающихся по типу циркуляции и соответственно по режиму облачности и увлажнения.

Выявленные закономерности обусловлены прежде всего тем, что в континентальном климате значительные контрасты температур существенно зависят от различий в приходе радиации. В то же время облачность сглаживает возможные различия в радиационном балансе отдельных местообитаний.

Кроме того, указанное соотношение мер сопряженностей отражает известное в экологии свойство расширения пределов толерантности и соответственно повышения устойчивости к какому-либо изменяющемуся фактору (в данном случае к радиации) при благоприятных значениях другого фактора среды (в данном случае в основном увлажненности).

При достаточно широком диапазоне толерантности к условиям прихода радиации за вегетационный период виды в большей степени различаются по отношению к энергетическим ресурсам зимнего периода (рис. 71). Из рассмотренных дальневосточных пород наиболее «теплую» нишу в двухмерном экологическом пространстве занимает дуб монгольский, наиболее «холодную» — лиственница ольгинская. Сужение радиационных

ниш за счет зимнего режима радиации подтверждает увеличение зависимости между видовым составом и термическими условиями зимы (см. табл. 73).

Перекрытие ниш основных лесобразующих пород Дальнего Востока иллюстрирует возможное их содоминирование в различных по теплообеспеченности условиях местопроизрастания (при прочих равных условиях), а также области контакта ареалов этих пород. Отсюда очевидна и взаимозаменяемость видов на одних и тех же местообитаниях в ходе экзодинамических сукцессий [41, 97, 125, 148, 153 и др.].

Связаны ли радиационные ниши со светолюбием породы? Очевидно в той степени, в какой режим ФАР связан с режимом ИНТ радиации. Светолюбие вида скорее будет проявляться через структурные характеристики древесного яруса (в том числе сомкнутость и ажурность), которые формируются в различных условиях по приходу радиации, а также через изменение интенсивности продукционного процесса. Во всяком случае (как видно из рис. 71) различные по теневыносливости виды ель и лиственница занимают близкие ниши. Второстепенная роль светолюбия подтверждается также большей сопряженностью между доминантом и радиацией за зимний сезон — в период физиологического покоя.

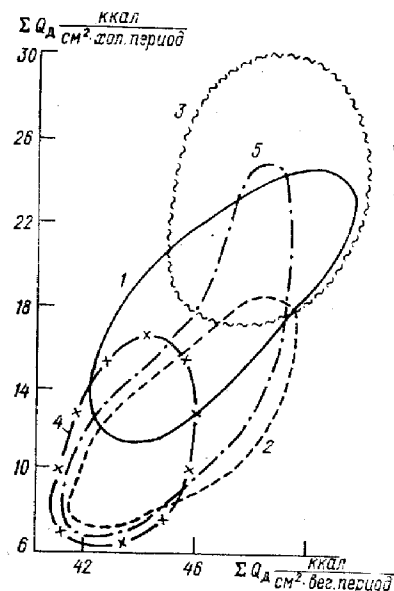


Рис. 71. Радиационные ниши по суммарной радиации за вегетационный и холодный периоды для некоторых дальневосточных пород.

- 1) кедр корейский, 2) ель аянская,
- 3) дуб монгольский, 4) лиственница ольгинская, 5) береза маньчжурская.

У.4. РАДИАЦИОННЫЕ НИШИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

Приведенные в табл. 77 нормированные меры сопряженности отражают взаимоотношения растительности и прихода радиации на уровне сообществ. Увеличение зависимости на более низких классификационных уровнях объясняется увеличением устойчивости системы по мере укрупнения классификационного уровня по отношению к совокупности внешних возмущений [117, 127, 134, 148, 153 и др.], одним из которых является

Нормированные меры сопряженности K' для растительных сообществ
Дальнего Востока

Классификационные единицы	ΣQ_d за период		
	вегетации	холодный	вегетации и холодный
Группа формаций	0,011	0,021	0,031
Формация	0,011	0,020	0,052
Класс ассоциаций	0,015	0,022	0,055
Группа ассоциаций	0,028	0,068	0,074
Вид	0,043	0,072	0,085

изменение энергообеспеченности местообитаний. Таким образом, соотношение сопряженностей в данном случае является наглядным примером общего гомеостаза [117] сообществ.

Так же как и для видов, образующих экотипы, условия зимнего режима оказывают большее воздействие на распределение растительности, чем приход радиации за вегетационный период.

Фактом, косвенно указывающим на существенное значение теплообеспеченности в формировании многообразия растительного покрова в условиях Приморского края, является преобладание групп ассоциаций с участием мезофильных видов [125]. Так как растительность в целом является индикатором условий произрастания, то режим увлажнения конкретного региона можно рассматривать как благоприятный при сравнительно низкой вероятности экстремальных (сухих или избыточно влажных) условий местообитаний.

В целом ниши на уровне групп формаций и формаций согласуются с нишами лесообразующих пород (рис. 72). Но для последних, как правило, ниша уже, чем для соответствующих сообществ¹. Так, например, формация лиственничников (из группы формаций светлохвойных лесов) ограничена низкими значениями ΣQ_d как за холодный, так и за теплый период. Однако совместно с дубом лиственница вероятна в местообитаниях с высокой энергообеспеченностью (рис. 73). Объясняется это тем, что в силу устойчивости лиственницы к низким температурам она вытесняется на холодные местообитания (северные склоны и инверсионные части теплых склонов) другими более конкурентноспособными видами, где образует чистые лиственничники. В то же время благодаря лабильности своего фотосинтетического аппарата и соответственно широкой экологической амплитуде лиственница как светлюбивая порода

¹ Аналогичное явление было отмечено в работе [134].

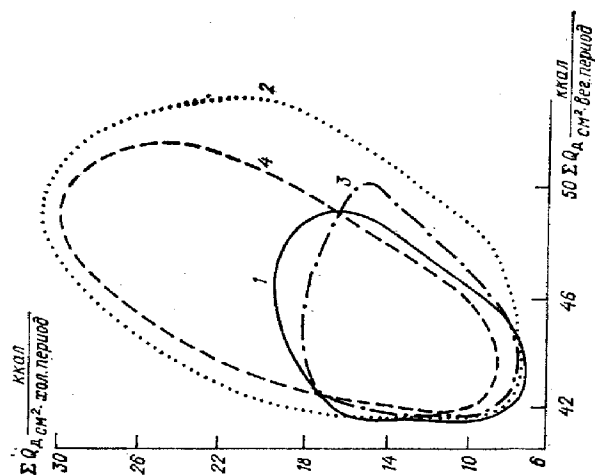


Рис. 73. Радиационные ниши формации лиственничников (1 — по наиболее вероятному состоянию, 2 — общая область распространения), классов ассоциаций лиственничников чистых (3) и лиственничников с дубом (4). Восточный макросклон Среднего Сихотэ-Алиня.

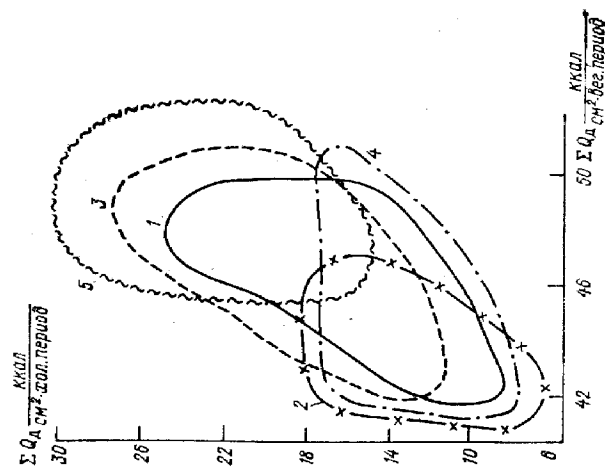


Рис. 72. Радиационные ниши групп формаций дальневосточных лесов. Восточный макросклон Среднего Сихотэ-Алиня. 1) темнохвойные леса, 2) светлохвойные, 3) широколиственно-хвойные, 4) мелколиственные, 5) широколиственные.

может формировать сообщества и в условиях с высоким приходом радиации.

Группа формаций широколиственных лесов (представленная одной формацией дубовых лесов) занимает другую крайнюю нишу с наиболее высоким приходом радиации в оба сезона (рис. 74). Распространение ареала в область более низких уровней энергообеспеченности связано со спецификой современной лесной растительности в прибрежной полосе, где чистые дубравы занимают практически все склоны [97]. Сообщества класса ассоциации «дубняки с кедром» характерны уже для более континентальных условий, и особенности их распространения во многом определяются требованием дуба к достаточно высокой теплообеспеченности [34, 35, 41].

Потенциальные возможности распространения представителей групп формаций темнохвойных лесов — пихтово-еловых [89, 97, 135, 148 и др.] — как к северу, так и к югу определяются широким диапазоном толерантности к радиационным условиям зимнего периода (рис. 75). В целом встречаемость пихтово-еловых лесов в разнообразных по приходу радиации условиях определяется широкими взаимными экологическими амплитудами субдоминирующих пород древесного яруса.

Группа формаций мелколиственных лесов является производной и занимает при экзодинамических сменах те же местообитания, которые типичны для коренных лесов темнохвойных и широколиственно-хвойных групп формаций [97]. Ниша формации белоберезовых лесов (доминант *Betula mandshurica*) смещена в более «холодную» область: за вегетационный период $\Sigma Q_d = 43 \div 47$ ккал/см², за холодный период $\Sigma Q_d = 9 \div 15$ ккал/см² (среднекрутые склоны восточной, юго-западной и северных экспозиций).

* * *

Приведенные выше данные свидетельствуют о значительном перекрытии радиационных ниш лесообразующих пород. При этом в результате конкуренции происходит как вытеснение вида, так и дивергенция ниш [134]. Первое иллюстрируется смещением ниши на примере лиственных лесов, второе — на примере расхождения ниш отдельных ассоциаций одной формации и т. п. Для области перекрытия характерно преобладание олигодоминантных сообществ, древесный ярус которых состоит из двух-трех кондоминантов—содоминантов (леса коренных темнохвойных и широколиственно-хвойных групп формаций). С другой стороны, для крайних областей типичны монодоминантные сообщества, подобные дубовым и лиственничным лесам.

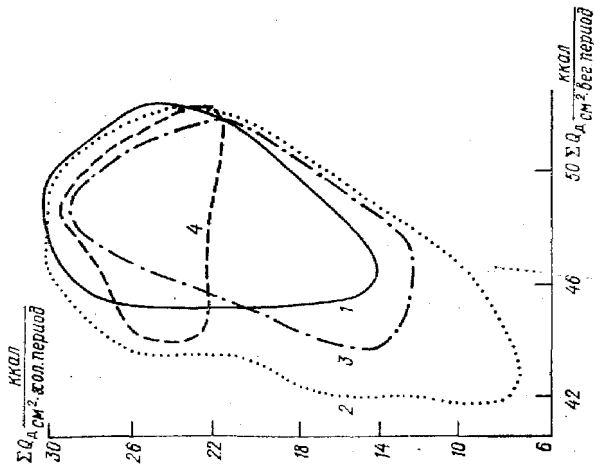


Рис. 74. Радиационные ниши формации дубовых лесов (1, 2), классов ассоциаций дубняков чистых (3) и дубняков с кедром (4). Восточный макросклон Среднего Сихотэ-Алиня. Пояснения к 1 и 2 см. рис. 73.

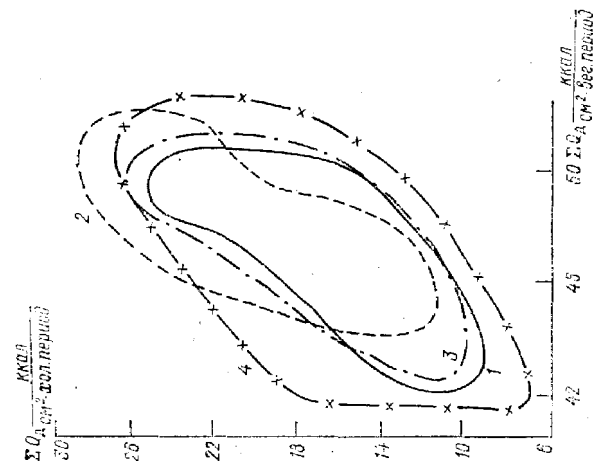


Рис. 75. Радиационные ниши группы формаций темнохвойных лесов (1), формаций широколиственно-кедровых (2), кедрово-еловых (3), пихтово-еловых (4). Восточный макросклон Среднего Сихотэ-Алиня.

В.5. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕПЛА И ВЛАГИ НА ВЫСОТНО-ПОЯСНУЮ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЮ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В работах Е. А. Садовничей и Н. М. Чебаковой [143, 167] был проведен анализ влияния режима увлажнения территории на высотную дифференциацию растительности в ус-

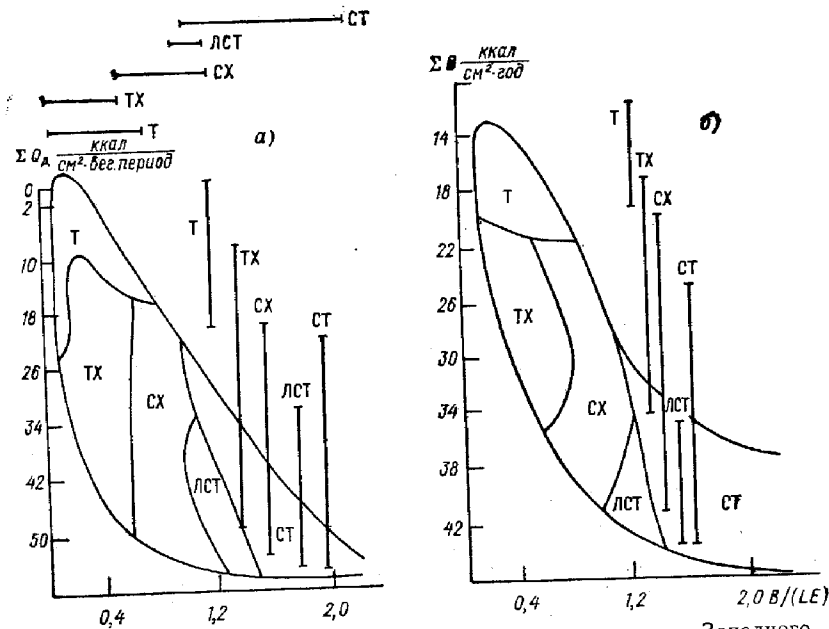


Рис. 76. Высотно-поясная дифференциация растительности Западного Саяна в зависимости от сумм суммарной радиации за период с $t_b > 10^\circ\text{C}$ и радиационного индекса сухости (а), а также от годовых сумм радиационного баланса и радиационного индекса сухости (б). Составлено по данным [143].

Вертикальные линии — амплитуды по ΣQ_d и $\Sigma B_{\text{год}}$, горизонтальные — амплитуды по $B/(LE)$; тундра (Т), темнохвойные леса (ТХ), светлохвойные леса (СХ), лесостепь (ЛСТ), степь (СТ).

ловиях Западного Саяна. С этой целью был использован радиационный индекс сухости, предложенный М. И. Будыко [29, 69]:

$$\alpha = B/(LE), \quad (53)$$

где B — радиационный баланс за год, LE — количество тепла, необходимое для испарения годовой суммы осадков.

Как видно из рис. 76, замена годовой ΣB на ΣQ_d за вегетационный период практически не меняет общей картины распределения растительности. Дополнительное введение индекса сухости, наоборот, четко дифференцирует положение высотнорастительных поясов. В этом случае амплитуды по $B/(LE)$ перекрываются в значительно меньшей степени, чем радиационные ниши.

Из приведенных ниже значений $B/(LE)$ для основных географических зон равнинных территорий (1) и для Западного Саяна (2)

Регион	Тундра	Лесная зона	Степная зона
1 [69]	0,2—0,3	1,3—1,3	1—2,0
2 [143]	0,15—1,00	0,2—1,2	1,0—2,2

следуют два интересных вывода: во-первых, ареал горной тундры шире по сравнению с равнинной, что объясняется наличием в горах различных типов тундровой растительности — от мохово-лишайниковых до более ксерофитных; во-вторых, отмечается близость ареалов горной тундры и горных степей в наиболее холодной и влажной части последнего. При этом низкие значения α отражают условия на южном макросклоне Западного Саяна, где степь поднимается до 1500—2000 м при малом количестве осадков. На сухих и холодных плоскогорьях здесь наблюдается тундро-степь. Иными словами, в горных условиях граница между горной тундрой и другими растительными поясами определяется в большей степени энергообеспеченностью местообитаний, чем режимом увлажнения.

По данным [143], в пределах области распространения темнохвойных лесов самую теплую и влажную нишу занимают черневые пихтовые горные леса, самую холодную — подгольцовые кедровые и пихтово-кедровые леса. Последние при $\alpha = 0,2 \div 0,3$ в I и II климатических районах сменяются альпийскими лугами. Относительно теплую ($\Sigma B = 22 \div 28$ ккал/(см² × год)) и влажную область занимают горно-таежные леса. Из них пихта приурочена к самым влажным местообитаниям ($\alpha = 0,25 \div 0,35$), кедр — к средним (0,35—0,50) и лиственничники с кедром — к самым сухим (0,50—0,62), граничащим со светлохвойными лесами. Наиболее теплую нишу ($\Sigma B = 30 \div 40$ ккал/(см² · год)) из светлохвойных лесов занимают сосновые, сосново-лиственничные подтаежные леса, наиболее холодную ($\Sigma B = 20 \div 30$ ккал/(см² · год)) — лиственничные на верхней границе распространения леса.

Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными Д. И. Назимовой и Н. И. Поликарповым [109, 124] для Западного Саяна, которые в качестве характеристик среды использовали $\Sigma t_b \geq 10^\circ\text{C}$ и годовые суммы осадков. Отсюда следует, что для характеристики теплообеспеченности (энергообеспеченности) местообитаний можно применять как радиационные факторы, так и непосредственно данные по термическому режиму. При этом не будет принципиальных расхождений в окончательных выводах. Однако введение в анализ информации о режиме увлажнения расширяет и уточняет наши представления об экологическом пространстве растительных сообществ и отдельных видов.

Исследование роли растительности в процессах энерго- и массообмена различного масштаба имеет большое научное и прикладное значение для дальнейшего развития фундаментальных исследований в области радиационной климатологии, микроклиматологии, лесной метеорологии и агрометеорологии, экологии, охраны природы, ландшафтоведения, геоморфологии, почвоведения, биогеоценологии, физиологии растений, лесного и сельского хозяйства и т. п. Многоаспектность этой проблемы обусловлена тем, что

— с одной стороны, растительность является специфичным типом подстилающей поверхности Земли, оказывающим существенное влияние на процессы в атмосфере, гидросфере и литосфере;

— с другой стороны, растительность является важнейшим компонентом биосферы Земли, с фотосинтетической деятельностью которого связан глобально важный процесс утилизации солнечной энергии и соответственно пищевые и сырьевые ресурсы Земли, а также содержание кислорода в атмосфере.

В монографии эта междисциплинарная проблема рассматривается в плане исследования механизмов взаимодействия между солнечной радиацией и лесной растительностью для наиболее сложных природных объектов — горных районов.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время большинство экспериментальных и теоретических работ по радиационному режиму горных районов освещают по сути только два уровня возможности преобразования солнечной радиации: в результате воздействия облачности и угловых координат наклонных поверхностей. При этом информация о приходе радиации к произвольно ориентированной поверхности практически является конечной и влияние характера самой подстилающей поверхности не рассматривается (за исключением небольшого числа работ, посвященных радиационному балансу и альбедо).

Несомненно, что подобная информация полезна для решения прикладных задач гелиотехники, строительства, при изучении теплового и водного баланса открытых склонов, в практике сельского хозяйства и т. п. Но ее ценность для решения задач лесного хозяйства, вопросов метеорологии и гидрологии облесенных склонов значительно меньше, ибо данные об энергоресурсах открытых склонов являются только исходными при изучении энерго- и массообмена как внутри РП, так и между РП и атмосферой.

Кроме того, в фитоактинометрии накоплен обширный экспериментальный материал о трансформации солнечной радиации в равнинных лесах и создан целый ряд математических моделей энергообмена между РП и атмосферой. Однако и в этой области горные растительные сообщества оставались практически неизвестным объектом. В то же время специфика радиационного режима открытых местообитаний в горных районах и отсутствие соответствующих данных о структуре горных РП требовали осторожного подхода к априорному распространению полученных ранее представлений о закономерностях ослабления радиации в равнинных РП на горные растительные сообщества.

Проведение нами исследования — практически первые систематические исследования радиационного режима горных РП, в которых соблюдены основные методические требования к фитоактинометрическим наблюдениям. Эти исследования естественно не охватывают все возможные варианты местообитаний и РП, ибо их целью не являлась инвентаризация радиационных (световых) условий под пологом горных лесов. Прежде всего нас интересовало, насколько специфично горное растительное сообщество в плане преобразования солнечной энергии. Для выявления этой специфики основной объем полевых наблюдений был выполнен в местообитаниях с оптимальными для произрастания лесной растительности условиями тепло- и влажорежима. Следует отметить, что при анализе фитоактинометрических данных основное внимание уделялось изучению зависимостей между пропусканием радиации и такими характеристиками структуры РП, как сомкнутость, ажурность полога крон и тип пространственного размещения. Это было сделано из соображений, что при экспериментальных исследованиях указанные характеристики (особенно в горных условиях) методически определяются значительно проще, чем данные о распределении фитомассы и поверхности фитоэлементов в пологе лесных РП.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что, несмотря на значительное разнообразие прихода радиации в различных физико-географических районах, закономерности дальнейшей трансформации солнечной энергии растительным покровом весьма универсальны. Последнее обусловлено способностью РП (монокультурой, кроной отдельного дерева,

лесным ценозом в целом), как и отдельным листом, поглощать строго определенную долю приходящей радиации. Сохранение общих закономерностей ослабления нисходящих потоков радиации в разнообразных РП является доказательством адаптивности фитоценозов к режиму радиации в конкретных условиях произрастания, которая достигается через процессы саморегуляции структуры, обеспечивающие максимально возможное заполнение объема РП фитоэлементами. Этот же результат доказывает ведущую роль структуры в определении радиационного режима РП.

Данные, приведенные в монографии, свидетельствуют о том, что не существует принципиальных различий в структуре древесного яруса равнинных и горных лесов. Для условий оптимального тепло- и влагорежима (вопреки распространенному мнению) наиболее характерным типом структуры является случайный тип пространственного размещения фитоэлементов. Этот тип формируется при комбинации определенным образом упорядоченных структур отдельных ярусов. Причем формирование упорядоченной структуры (и даже регулярного типа размещения, встречающегося в естественных древостоях) при ослабленной корневой конкуренции может осуществляться через минимизацию взаимного затенения особей как в пределах яруса, так и между ярусами.

При отсутствии принципиальных различий в характере трансформации радиации специфика радиационного режима горных РП заключается в следующем. Во-первых, в горных условиях создаются пространственные различия в приходе радиации к РП (и поглощенной ими), произрастающим на разных склонах одной долины, в десятки и сотни раз превышающие различия для равнинных РП, удаленных друг от друга на аналогичное расстояние. Во-вторых, в наличии асимметрии дневного и сезонного хода абсолютных величин радиации под пологом, степень проявления которой зависит от ориентации склона и прозрачности полога.

С указанными особенностями, в свою очередь, связана специфика продукционного процесса в горных лесах. Значительные контрасты в приходе радиации к подстилающей поверхности склонов под пологом леса и занятых травяно-кустарниковыми сообществами определяют необходимость дифференцированного подхода при составлении рекомендаций по лесовосстановительным и другим мероприятиям для различных склонов даже при наличии близких таксационных характеристик древостоев.

Проведенные исследования позволили впервые количественно оценить и сравнить климатообразующую роль лесной растительности и рельефа в определении режима коротковолновой солнечной радиации в горных условиях. В монографии показано, что РП оказывает более мощное воздействие на поток

радиации, поступающей к поверхности склона под полог, чем облачность или сам рельеф. Так, относительное ослабление радиации пологом сомкнутых древостоев на порядок превышает наиболее интенсивное ослабление, характерное для плотного слоя облачности нижнего яруса, и снижение прихода радиации, наблюдаемое на открытых северных крутых склонах.

В зависимости от видового состава РП может усугублять или нивелировать сезонные контрасты в пределах одного местобитания и пространственные различия, а в отдельных случаях способствовать изменению знака вертикальных градиентов и пространственных контрастов. Максимально возможное сокращение последних отмечается в период активной вегетации. В этот период закономерности распределения радиации под пологом принципиально отличаются от таковых для открытых склонов. Наблюдаемое возрастание сумм радиации под пологом с крутизной для всех экспозиций обусловлено увеличением разреженности древостоев на крутых склонах.

Совокупное воздействие рельефа и РП способствует формированию в течение теплого периода пространственных различий в приходе радиации под полог древостоев одного видового состава, более чем в 2—4 раза превышающих по абсолютной величине межширотные градиенты (на 1° ф) открытых местобитаний равнинных территорий. Смена коренных типов леса в результате хозяйственной деятельности на их дериваты (соответственно и изменение прозрачности полога) обуславливает формирование различий на склонах одной экспозиции и крутизны, превышающих в ряде случаев более чем в 10 раз межширотные градиенты. Однако указанные соотношения в несколько раз меньше, чем пространственные контрасты между открытыми, необлесенными склонами. Несомненно, что подобные различия, соизмеримые с энергоресурсами равнинных территорий, удаленных по широте на сотни и тысячи километров, имеют принципиальное значение в определении дальнейших изменений энерго- и массообмена открытых и облесенных склонов.

С другой стороны, сглаживание пространственных контрастов в суммах радиации в течение теплого периода между облесенными склонами по сравнению с открытыми, а также усиление связи между видовым составом древостоев и суммами радиации за холодный период свидетельствуют о том, что многообразие ландшафтно-экологических условий в горных районах связано преимущественно с пространственными различиями, формирующимися в течение холодного и переходного периодов. При этом существенное значение в определении пространственной дифференциации растительности имеет фактор увлажнения территории.

Таким образом, последовательное рассмотрение процесса трансформации солнечной радиации в результате воздействия геофизических факторов, рельефа и структуры РП позволило перейти от гипотетических представлений о радиационном режиме наклонных поверхностей к анализу прихода радиации к подстилающей поверхности склонов с учетом наличия и свойств произрастающей на них растительности. Приведенные в монографии данные являются исходными для дальнейшего развития фундаментальных исследований климатообразующей и средообразующей роли лесной растительности в горных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашина Е. В., Горбачев В. А. Горизонтальная изменчивость пропущенной посевами ячменя интегральной радиации.— Труды ИЭМ, 1974, вып. 5 (49), с. 83—93.
2. Абашина Е. В., Федосеев А. П., Козинец Д. В. Геометрическая структура и радиационный режим ячменя различных норм посева.— Труды ИЭМ, 1974, вып. 5 (49), с. 58—82.
3. Авасте О., Молдау Х., Шифрин К. С. Спектральное распределение прямой и рассеянной радиации.— В кн.: Исследования по физике атмосферы. Таллин: Изд-е АН ЭстССР, 1962, вып. 3, с. 23—71.
4. Аверкиев М. С. Инсоляция плоской поверхности, наклонной к горизонту, на широте г. Горького.— Ежемесячник Горьковского краевого УЕГМС, 1933, № 11—12, с. 5—29.
5. Айзенштат Б. А. О поступлении рассеянной радиации на склоны и дно горной долины.— Труды ГГО и САРНИГМИ, 1961, вып. 107, с. 84—104.
6. Айзенштат Б. А., Зуев М. В. Радиационный режим, тепловой баланс и микроклимат горной долины.— Труды САРНИГМИ, 1961, вып. 6 (21), с. 91—97.
7. Акопова Д. П. Радиационный и тепловой режимы в дубово-кленовых культурах на высоте 1300 м в области питания минеральных источников.— Науч. труды ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, 1972, вып. 11, с. 72—77.
8. Акулова Е. А., Князева И. Г., Цельникер Ю. Л. Видимая инфракрасная радиация под пологом хвойных и лиственных деревьев.— В кн.: Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса. М.: Наука, 1967.— 576 с.
9. Акулова Е. А., Хазанов В. С. и др. О методике изучения светового режима в лесу.— Бот. журн., 1966, т. 51, № 5, с. 681—686.
10. Алексеев В. А. Световой режим леса.— Л.: Наука, 1975.— 227 с.
11. Алисов Б. П. Климат СССР.— Изд-во МГУ, 1956.— 126 с.
12. Алисов Б. П., Полтараус Б. В. Климатология.— Изд-во МГУ, 1974.— 300 с.
13. Архангельский В. Л. Некоторые особенности атмосферных процессов в районе Сихотэ-Алиня.— Труды ДВНИГМИ, 1957, вып. 2, с. 68—95.
14. Барашкова Е. П. Некоторые закономерности в режиме суммарной радиации.— Труды ГГО, 1959, вып. 80, с. 153—160.

15. Барашкова Б. П., Гаевский В. Л. и др. Радиационный режим территории СССР.—Л.: Гидрометеиздат, 1961.—528 с.
16. Бартеньева О. Д., Полякова Е. А., Русин Н. Н. Режим естественной освещенности на территории СССР.—Л.: Гидрометеиздат, 1971.—238 с.
17. Белнинский В. А., Гараджа М. П. и др. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба.—Изд-во МГУ, 1968,—80 с.
18. Белыева И. П. Потоки отраженной и рассеянной радиации на склоны.—Труды ГГО и САРНИГМИ, 1961, вып. 107, с. 105—111.
19. Белыева И. П. О расчете дневных сумм суммарной радиации на наклонные поверхности в облачные дни.—Изв. АН УзССР, сер. физ.-мат. наук, 1962, вып. 4, с. 38—46.
20. Березников К. П., Крамер Л. М. К вопросу о радиационном режиме пологих склонов в Приморском крае.—Труды ДВНИГМИ, 1973, вып. 40, с. 61—76.
21. Березников К. П., Крамер Л. М. Радиационный режим склонов в Приморском крае применительно к плодоводству.—Труды ГГО, 1973, вып. 306, с. 121—132.
22. Берлянд Т. Г. Распределение солнечной радиации на континентах.—Л.: Гидрометеиздат, 1961.—226 с.
23. Берлянд Т. Г. Современный этап развития климатологических исследований солнечной радиации.—Тезисы докл. XI Всес. совещ. по актинометрии. Таллин, 1980, ч. 1, с. 4—9.
24. Берлянд Т. Г., Кароль И. Л. и др. Новое в изучении радиационного режима и динамики климата.—В кн.: Современные фундаментальные и прикладные исследования Главной геофизической обсерватории им. Воейкова. Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 126—133.
25. Берлянд М. Е., Новосельцев Е. П. К теории зависимости суммарной радиации от облачности.—Науч. сообщение Ин-та геологии и географии АН ЛитССР, 1962, т. 12, с. 109—115.
26. Борзенкова И. И. О некоторых закономерностях изменения составляющих радиационного и теплого балансов в горных районах.—Труды ГГО, 1965, вып. 79, с. 186—198.
27. Борзенкова И. И. Об особенностях радиационного режима горных областей.—Труды ГГО, 1970, вып. 263, с. 39—49.
28. Бугаев В. А. Климат Средней Азии и Казахстана.—Ташкент, 1946.—22 с.
29. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности.—Л.: Гидрометеиздат, 1956.—255 с.
30. Будыко М. И., Берлянд Т. Г. и др. Тепловой баланс Земли.—Л.: Гидрометеиздат, 1978.—40 с.
31. Василевич В. И. Статистические методы в геоботанике.—Л.: Наука, 1969.—230 с.
32. Вентцель Е. С. Теория вероятности.—М.: Наука, 1971.—640 с.
33. Выгодская Н. Н. Изменение радиационных характеристик по ярусам в сложном насаждении.—Труды VI Межведомств. совещ. по актинометрии и атмосферной оптике. Тарту: Валгус, 1966.
34. Выгодская Н. Н. Радиационный режим 30-летнего дубняка в точной и сезонной динамике.—В кн.: Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса. М.: Наука, 1967, с. 77—94.
35. Выгодская Н. Н. Возрастная динамика оптических свойств высокопродуктивных древостоев ясенено-осокковой дубравы.—В кн.: Взаимоотношение компонентов биогеоценоза в лиственных молодниках. М., Наука, 1970, с. 78—107.

36. Выгодская Н. Н. Влияние структуры крон ели на статистические характеристики радиационного поля.—В кн.: Биол. спектрофотометрия и фитоактинометрия. Красноярск, 1973, с. 32—33.

37. Выгодская Н. Н. Оценка возможных изменений энергетики биогеосистем при смене их растительного компонента.—Докл. VI съезда Геогр. об-ва СССР. Л., 1975, с. 15—18.

38. Выгодская Н. Н. Методика фитоактинометрических исследований в горных районах.—В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 21—37.

39. Выгодская Н. Н., Виноградов Н. П., Виноградов А. Н. Пространственное распределение ореховых лесов и их продуктивность в зоне северного массива плодовых лесов Южной Киргизии.—Докл. VI съезда Геогр. об-ва СССР. Л., 1975.

40. Выгодская Н. Н., Воронов А. Г. и др. Структура полога тропического и субтропического леса островов юго-западной части Тихого океана.—В кн.: Экология и рациональное использование островных экосистем. (Материалы по проекту № 7 междунар. программы «Человек и биосфера».) Владивосток, 1978, 1978, с. 18—20.

41. Выгодская Н. Н., Галицина Г. А. и др. Количественная оценка роли солнечной радиации в определении видовой структуры растительных сообществ.—В кн.: Биофизические и системные исследования в лесной биогеоценологии. Петрозаводск, 1976, с. 76—77.

42. Выгодская Н. Н., Голубева Е. И. и др. Эффективность использования солнечной радиации растительностью вторичных сообществ.—В кн.: Исследования вторичных биогеоценозов Среднего Сихотэ-Алиня. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 119—131.

43. Выгодская Н. Н., Некрасов Н. П. и др. Приход и перераспределение солнечной радиации на территории юга Приморского края.—В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 61—101.

44. Выгодская Н. Н., Жукова В. М. Рассеяние и поглощение радиации в основных фитоценозах разного возраста.—В кн.: Биогеоценологические исследования в широколиственно-еловых лесах. М.: Наука, 1971, с. 280—289.

45. Выгодская Н. Н., Зукерт Н. В. Изменение оптических свойств лесостепных дубрав под влиянием засоления почв.—Лесоведение, 1967, № 5, с. 37—44.

46. Выгодская Н. Н., Зукерт Н. В. и др. Радиационный режим под пологом горных лесов.—В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 162—178.

47. Выгодская Н. Н., Зукерт Н. В., Садовничая Е. А. Статистические характеристики радиационного поля в зависимости от сомкнутости древесного яруса еловых насаждений.—Лесоведение, 1973, № 5, с. 22—30.

48. Выгодская Н. Н., Зукерт Н. В., Созинов Л. В. Радиация в области тени березы.—Тезисы докл. XI Всес. совещания по актинометрии, ч. 7. Таллин, 1980, с. 50—53.

49. Выгодская Н. Н., Зукерт Н. В., Солнцева О. Н. Связь структуры и продуктивности луговых фитоценозов с радиационным режимом.—Бюлл. Моск. об-ва испыт. природы, отд. биол., 1970, т. 75, № 6, с. 86—98.

50. Выгодская Н. Н., Лаврентьев А. А. и др. Автоматическая подвижная метеостанция в климатологических исследованиях.—Метеорология и гидрология, 1977, № 2, с. 99—102.

51. Выгодская Н. Н., Лебедева М. Г. Влияние фотосинтетически активной радиации на рост и развитие подростка хвойных пород Дальнего Востока.—Вест. МГУ, сер. геогр., 1977, № 5, с. 119—126.

52. Выгодская Н. Н., Некрасов В. П. и др. Таблицы прямой и суммарной радиации, поступающей к склонам на территории СССР.
53. Выгодская Н. Н., Пузаченко Ю. Г., Скулкин В. С. Зависимость состава, сомкнутости и роста древостоев от климатических условий.— В кн.: Количественные методы анализа растительности. П. Рига, 1971, с. 47—55.
54. Выгодская Н. Н., Пузаченко Ю. Г. и др. Закономерности формирования массы травяного яруса елово-широколиственных лесов.— В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 112—122.
55. Выгодская Н. Н., Сазанова С. Р., Шутьгин И. А. Радиационный режим в области тени крон ели.— В кн.: Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Гидрометеиздат, 1974, с. 384—389.
56. Выгодская Н. Н., Шерман Е. В. Некоторые характеристики геометрической структуры горных лесов.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 153—161.
57. Гаврилова М. К. Радиационный режим в лиственных лесах юго-западной Якутии.— Лесоведение, 1969, № 1, с. 16—23.
58. Гагуа В. П. Методика косвенного определения часовых величин радиационного баланса.— Труды ГГО, 1968, вып. 233, с. 186—198.
59. Галенко Э. П. Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойных лесов северной тайги.— Автореф. канд. дисс. М., 1978.— 20 с.
60. Гальперин Б. М. Методика приближенных расчетов прихода прямой радиации по данным стационарных метеорологических наблюдений.— Труды ЛГМИ, 1956, № 4, с. 79—106.
61. Гальперин Б. М., Серякова Л. П. Рассеянная и суммарная солнечная радиация при различных условиях облачности.— Труды ГГО, 1964, вып. 152, с. 96—109.
62. Гейтц Д. М., Джонсон Х. Б. и др. Геофизические факторы, влияющие на продуктивность растений.— В кн.: Теоретические основы фотосинтетической продуктивности. М.: Наука, 1972, с. 406—419.
63. Гойса Н. И. Уточнение методики расчета суммарной радиации по наблюдениям за облачностью.— Труды УкрНИГМИ, 1961, вып. 26, с. 3—13.
64. Гойса Н. И., Перелет Н. А. Методические указания для расчета фотосинтетически активной радиации (ФАР).— Киев (УкрНИГМИ), 1977.— 26 с.
65. Голубева Е. И., Лебедева М. Г. и др. Влияние радиационного режима на формирование надземной фитомассы нижних ярусов вторичных лесов Среднего Сихотэ-Алиня.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 188—199.
66. Голубова Т. А. Количественные характеристики радиационного режима.— В кн.: Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967, с. 11—37.
67. Грейг-Смит П. Количественная экология растений.— М.: Мир, 1967.— 359 с.
68. Григорьев Г. Н. Радиационный режим южной тайги Нижнего Приангарья.— В кн.: Климатические условия и микроклимат таежных геосистем Сибири. Новосибирск: Наука, 1980, с. 49—109.
69. Григорьев А. А., Будыко М. И. О климатических факторах географической зональности.— В кн.: XIX Междунар. геогр. конгресс в Стокгольме. Изд. АН СССР, 1961, с. 268—275.
70. Грин А. М., Раунер Ю. Л., Утехин В. Д. Эффективность использования радиации и влаги в лесостепных экосистемах.— Изв. АН СССР, сер. геогр., 1970, № 4, с. 10—23.

71. Дадыкин В. П., Кононенко Н. В. О фиксации солнечной энергии древесными растениями.— Докл. на XII Междунар. бот. конгрессе. М.: Изд-во МЛТИ, 1975.— 13 с.
72. Дьяченко Л. Н. Связь между радиационным балансом и суммарной радиацией.— Метеорология и гидрология. 1958, № 8, с. 29—33.
73. Ефимова Н. А. Распределение фотосинтетически активной радиации на территории Советского Союза.— Труды ГГО, 1965, вып. 179, с. 118—130.
74. Ефимова Н. А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 214 с.
75. Зайцева И. И. Режим облачности над территорией юга Приморского края.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 102—117.
76. Зайцева И. И., Выгодская Н. Н. Влияние облачности на ослабление потоков коротковолновой солнечной радиации и оценка точности их расчета через характеристики облачного режима.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, с. 118—152.
77. Захарова А. Ф. Радиационный режим северных и южных склонов различной крутизны на различных широтах.— Уч. зап. ЛГУ, сер. геогр., 1959, № 269, вып. 13, с. 24—49.
78. Зейднс И. М., Некрасов В. П. Расчет возможных сумм прямой радиации, поступающей к склонам.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 38—46.
79. Зукерт Н. В. Пространственная изменчивость поля солнечной радиации под пологом леса.— Автореф. канд. дисс. М., 1975.— 28 с.
80. Зукерт Н. В. Доля ФР в интегральном потоке прямой солнечной радиации в Приморском крае.— В кн.: Исследования вторичных биогеоценозов Среднего Сихотэ-Алиня. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 19—23.
81. Зукерт Н. В., Лебедева М. Г., Шерман Е. В. Фитометрические характеристики возобновления некоторых хвойных пород Дальнего Востока.— В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 142—145.
82. Зукерт Н. В., Созинов Л. В. Вертикальное ослабление ФАР в древостое с господством березы маньчжурской.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 179—187.
83. Иванов Л. А. Свет и влага в жизни наших древесных пород.— М., 1946.— 63 с.
84. Ипатов В. С., Тархова Т. Н. Количественный анализ ценологических эффектов в размещении деревьев по территории.— Бот. журн., 1975, т. 60, № 9, с. 1237—1250.
85. Кайрюкштис Л. А. Формирование елово-лиственных молодняков.— Каунас: Изд-е ЛитНИИЛХ, 1959.— 245 с.
86. Кайрюкштис Л., Иодвалькис А. Явление смены внутривидовой конкуренции на взаимную толерантность в еловых фитоценозах.— Докл. на XII Междунар. бот. конгрессе. Каунас, 1975.— 24 с.
87. Калитин Н. Н. Актинометрия.— Л.: Гидрометеиздат, 1938.— 324 с.
88. Клинецов А. П. О радиационном режиме под пологом леса на Сахалине.— Лесоведение, 1976, № 3, с. 31—36.
89. Колесников Б. П. Лесорастительное районирование Дальнего Востока и вопросы лесовосстановления и создания лесов защитного значения.— В кн.: Вопросы развития лесного хозяйства и лесной промышленности Дальнего Востока. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 92—105.

90. Колесников Б. П. Кедровые леса Дальнего Востока.— Труды ДВФ АН СССР, сер. бот., т. 2 (4), 1956, с. 88—103.
91. Кондратьев К. Я. Актинометрия.— Л.: Гидрометеоздат, 1965.— 690 с.
92. Кондратьев К. Я., Манолова М. П. Угловое распределение интенсивности радиации, отраженной естественными подстилающими поверхностями.— Вести. ЛГУ, 1957, № 10, с. 52—58.
93. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П. Радиационный режим наклонных поверхностей.— Л.: Гидрометеоздат, 1978.— 215 с.
94. Корецкий А. П. О водном режиме почв Среднего Сихотэ-Алиня.— В кн.: Исследования вторичных биогеоценозов Среднего Сихотэ-Алиня.— Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 37—57.
95. Кузьмин П. П. Радиационный баланс полого леса в период снетаяния. Труды ГГИ, 1949, вып. 16 (70), с. 46—73.
96. Кульбах С. Теория информации и статистика.— М.: Наука, 1967.— 387 с.
97. Курендова Г. Э. Естественные и антропогенные смены растительности Приморья и Южного Приамурья.— Новосибирск, 1973.— 228 с.
98. Лайск А. Статистический характер ослабления радиации в растительном покрове.— В кн.: Режим солнечной радиации в растительном покрове. Тарту: Изд-е ИАФА АН ЭССР, 1968, с. 81—111.
99. Лебедева М. Г. Фитометрические характеристики подростов основных хвойных пород Дальнего Востока.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 200—211.
100. Линкевич С. Ф. Распределение основных радиационных элементов в пологе ели Шренка.— В кн.: Экосистемные исследования в лесах Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1978, с. 101—118.
101. Линкевич С. Ф., Кожевинова Н. Д. Некоторые особенности радиационного режима в нижней части лесного пояса ельников хребта Терской Ала-Тау.— В кн.: Биогеографические исследования в Тянь-Шане. Фрунзе: Изд-во АН КиргССР, 1978, с. 88—102.
102. Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г. И. Физиология древесных растений.— М.: Лесная промышленность, 1974.— 421 с.
103. Малкина И. С., Цельникер Ю. Л., Якшина А. М. Фотосинтез и дыхание подростов.— М.: Наука, 1970.— 184 с.
104. Махоткина Е. Л., Янишевский Ю. Д. Характеристика распределения зональной рассеянной радиации и ее сумм.— Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 153—160.
105. Медведев А. Н. Значение инсоляции для формирования условий произрастания в горах Северного Тянь-Шаня.— Науч. труды Казахского с.-х. ин-та, 1975, т. 18, № 2, с. 91—97.
106. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений.— М.: Наука, 1971.— 576 с.
107. Молдау Х. А., Росс Ю. К. и др. Географическое распределение фотосинтетически активной радиации (ФАР) на территории Европейской части СССР.— В кн.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. М.: Наука, 1963, с. 149—153.
108. Мухенберг В. В. Некоторые особенности прихода солнечной радиации на наклонные поверхности.— Труды ГГО, 1965, вып. 179, с. 101—125.
109. Назимова Д. И. Горные темнохвойные леса Западного Саяна.— Л.: Наука, 1975.— 117 с.
110. Немченко В. А. Структура и динамика фитомассы травяно-кустарниковой сукцессионной стадии в поясе кедрово-широколиственных ле-

сов.— В кн.: Исследования вторичных биогеоценозов Среднего Сихотэ-Алиня. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 85—109.

111. Нестеров В. Н., Нестерова Е. С. Режим температуры и влажности воздуха в бассейне ручья Волковский.— В кн.: Исследования вторичных биогеоценозов Среднего Сихотэ-Алиня. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 23—36.
112. Нильсон Т. А. Об оптимальной структуре растительного покрова.— В кн.: Режим солнечной радиации в растительном покрове. Тарту: Изд-е ИАФА АН ЭССР, 1968, с. 112—146.
113. Нильсон Т. А. К определению радиационных характеристик растительности по полусферическим фотографиям.— В кн.: Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1977, с. 45—60.
114. Нильсон Т. А. Теория пропускания радиации неоднородным растительным покровом.— В кн.: Пропускание солнечной радиации растительным покровом. Тарту: Изд-е ИАФА АН ЭССР, 1977, с. 7—70.
115. Нильсон Т., Росс В., Росс Ю. Некоторые вопросы архитектоники растений и растительного покрова.— В кн.: Пропускание солнечной радиации растительным покровом. Тарту: Изд-е ИАФА АН ЭССР, 1977, с. 71—144.
116. Ничипорович А. А. Основы фотосинтетической продуктивности растений.— В кн.: Современные проблемы фотосинтеза. МГУ, 1973, с. 17—43.
117. Одум Ю. Основы экологии.— М.: Мир, 1975.— 740 с.
118. Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР.— Якутск, 1975.— 302 с.
119. Перелёт Н. А. Зависимость соотношения фотосинтетически активной и интегральной радиации от прозрачности атмосферы и облачности.— Труды УкрНИГМИ, 1970, вып. 94, с. 46—51.
120. Пивоварова З. И. О периоде осреднения и погрешности средних величин составляющих радиационного баланса.— Труды ГГО, 1973, вып. 303, с. 160—189.
121. Пивоварова З. И. Радиационные характеристики климата СССР.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 355 с.
122. Писаренко В. А. Сравнительная климатическая оценка ареалов ели Шренка и ели обыкновенной.— Изв. Кирг. геогр. об-ва, 1976, вып. 13, с. 55—59.
123. Плотников В. В. Эволюция структуры растительных сообществ.— М.: Наука, 1979.— 275 с.
124. Поликарпов Н. П., Назимова Д. И. Темнохвойные леса северной части Западного Саяна.— Труды Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1963.— 57 с.
125. Приход и перераспределение солнечной радиации в естественных биогеосистемах различного масштаба. Фонды Геогр. фак-та МГУ, 1976.— 345 с.
126. Проскураков М. А. Закономерности формирования пространственной структуры древостоя горных еловых лесов Тянь-Шаня.— Лесоведение, 1971, № 6, с. 3—10.
127. Пузаченко Ю. Г. Климатические параметры экологического оптимума ельников.— В кн.: Биологическая продуктивность ельников. Тарту, 1971, с. 243—248.
128. Пузаченко Ю. Г. Статистический анализ организации растительности.— Докл. Ин-та геогр. Сибири и Дальнего Востока, 1975, вып. 47, с. 10—19.

129. Пузаченко Ю. Г. Принципы информационного анализа.— В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, 1976, с. 5—37.
130. Пузаченко Ю. Г., Мошкин А. В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях.— В кн.: Итоги науки, сер. Медицинская география. М., 1969, вып. 3, с. 5—74.
131. Пылдмаа В. К. О распределении рассеянной радиации по небосводу.— В кн.: Исследования по физике атмосферы. Тарту, Изд-е АН ЭССР, 1963, № 4, с. 111—119.
132. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. Под ред. К. Я. Кондратьева.— Л.: Гидрометеоздат, 1960.— 564 с.
133. Раунер Ю. Л. Тепловой баланс растительного покрова.— Л.: Гидрометеоздат, 1972.— 210 с.
134. Риклефе Р. Основы общей экологии.— М.: Мир, 1977.— 424 с.
135. Розенберг В. А. Высокогорные пихтово-еловые леса Сихотэ-Алиня.— Проблемы ботаники, 1974, № 12, с. 240—246.
136. Росс Ю. К. Теория пропускания прямой солнечной радиации в горизонтально неоднородном растительном покрове.— В кн.: Солнечная радиация и продуктивность растительного покрова. Тарту, Валгус, 1972, с. 122—147.
137. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова.— Л.: Гидрометеоздат, 1975.— 342 с.
138. Росс Ю. К., Нильсон Т. А. Пространственная ориентация листьев в посевах и методика ее определения.— В кн.: Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. М.: Наука, 1966, с. 109—125.
139. Росс Ю. К., Тооминг Х. Г. Ослабление прямой и суммарной радиации внутри посевов сельскохозяйственных культур и описывающие ее полуэмпирические формулы.— В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин, Валгус, 1968, с. 283—288.
140. Руднев Н. И. Радиационный баланс леса.— М.: Наука, 1977.— 126 с.
141. Русин Н. П. Прикладная актинометрия.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.— 232 с.
142. Садовнича Е. А. Пропускание суммарной коротковолновой радиации пологом смешанных пихтово-кедровых насаждений Западного Саяна.— В кн.: Современные проблемы и методы географических исследований. Изд. МГУ, 1978, с. 6—21.
143. Садовнича Е. А. Роль солнечной радиации в дифференциации горных лесов Западного Саяна.— Автореф. канд. дисс. Красноярск, 1980.— 29 с.
144. Савинов С. И. О формулах, выражающих прямую и рассеянную радиацию в зависимости от степени облачности.— Метеорологический вестник, 1933, № 5—6, с. 146—151.
145. Самойленко В. С. Формирование температурного режима моря.— Л.: Гидрометеоздат, 1959.— 144 с.
146. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации.— Л.: Гидрометеоздат, 1968.— 232 с.
147. Скрыльник Т. А., Васильев А. П. Использование итерационной процедуры при районировании и классификации в метеорологии.— В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 59—70.
148. Скулкин В. С. Проверка возможности прогноза состава растительности на основе анализа общих закономерностей связи ее компонентов со средой.— В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 123—137.

149. Созинов Л. В., Труднева С. Н. Влияние экотопических характеристик на сомкнутость древесного яруса горных лесов Приморского края.— В кн.: Изучение природы, хозяйства и населения Сибири. Тезисы VI науч. конф. молодых географов Сибири и Дальнего Востока. Иркутск: Наука, СО АН СССР, 1975, с. 151—153.
150. Справочник по климату СССР. Температура воздуха и почвы. Вып. 23, 26, ч. 2, 4.— Л.: Гидрометеоздат, 1966, 1968.
151. Справочник по климату СССР. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Ч. 1, вып. 18, 19, 21, 26, 32.— Л.: Гидрометеоздат, 1966—1967.
152. Справочник по климату СССР. Устойчивость и точность климатических характеристик облачности. Под ред. О. А. Дроздова, И. Д. Колпачева.— Л.: Гидрометеоздат, т. 3, 1976.
153. Сукачев В. Н. Основные понятия лесной биогеоценологии.— В кн.: Основы лесной биогеоценологии. М.—Л.: Наука, 1964, с. 5—46.
154. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 200 с.
155. Тооминг Х. Г., Гуляев Б. И. Методики измерения фотосинтетически активной радиации.— М.: Наука, 1967.— 143 с.
156. Тооминг Х. Г., Нийлиск Х. И. Коэффициенты перехода от интегральной радиации к ФАР в естественных условиях.— В кн.: Фитоактинометрические исследования растительного покрова. Таллин, Валгус, 1967, с. 140—149.
157. Тооминг Х. Г., Нильсон Т. А. Основы энергетической адаптации растительного покрова к свету.— В кн.: Фитоактинометрические исследования растительного покрова. Таллин, Валгус, 1967, с. 35—63.
158. Тооминг Х. Г., Росс Ю. К. Ослабление интегральной радиации различными посевами кукурузы.— В кн.: Вопросы радиационного режима растительного покрова. Тарту: Изд-е ИФА АН ЭССР, 1965, с. 65—72.
159. Физико-географическое районирование СССР. Под ред. Н. А. Гвоздецкого.— Изд-во МГУ, 1968.— 112 с.
160. Фрей Т. Э. А. Некоторые математические и фитоценологические аспекты изучения характера размещения в фитоценозе.— Уч. зап. Тартус. ун-та, 1968, вып. 211, с. 57—90. (Труды по ботанике № 8.)
161. Фрей Т. Э. А. Калорийность растительных компонентов еловой экосистемы на стационаре Воорема (Эстония).— Тез. докл. V делег. съезда Всесоюз. бот. об-ва. Киев, 1973, с. 283—284.
162. Хазанов В. С., Цельникер Ю. Л. Измерение фотосинтетически активной радиации в лесу с помощью люксметра.— В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин: Валгус, 1968, с. 382—385.
163. Цельникер Ю. Л. Радиационный режим под пологом леса.— М.: Наука, 1969.— 98 с.
164. Цельникер Ю. Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений.— М.: Наука, 1978.— 211 с.
165. Цельникер Ю. Л., Выгодская Н. Н. Величина коэффициента экстинкции для потоков ФАР в пологе древесных и травяных фитоценозов.— Лесоведение, 1971, № 4, с. 68—71.
166. Цуцкиридзе Я. А. Радиационный и термический режимы территории Грузии.— Л.: Гидрометеоздат, 1967.— 163 с.
167. Чебакова Н. М. Связь продуктивности горных лесов Западного Саяна с гидротермическими факторами климата.— В кн.: Современные проблемы и методы географических исследований. Красноярск, 1977, с. 22—23.
168. Челпанова О. М. Средняя Азия. Климат СССР, вып. 3.— Л.: Гидрометеоздат, 1963.— 448 с.

169. Чернышев В. Д. Приспособление к свету подроста кедра корейского в различных эколого-фитоценологических условиях.— В кн.: Лесовосстановление в Приморском крае. Владивосток, 1969, с. 31—35.
170. Чернышев В. Д. Особенности проникновения солнечной радиации к поверхности почвы в многоярусных лесных ценозах Южного Приморья.— Труды Биолого-почв. ин-та АН СССР (ДНЦ), нов. серия, т. 12 (115), 1973.
171. Шипчанов И. Радиационный режим и фотосинтез на двустаянхите белоборо-смерчовые насаждения.— Физиология на растения, 1974, т. 3, с. 181—189 (София).
172. Шихлинский Э. М. Тепловой баланс Азербайджана.— Баку: Элм, 1969.— 200 с.
173. Шифрин К. С. К теории альбедо.— Труды ГГО, 1953, вып. 39 (101), с. 244—257.
174. Шульгин И. А. Солнечная радиация и растение.— Л.: Гидрометеоиздат, 1967.— 180 с.
175. Шульгин И. А. Растение и солнце.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973.— 251 с.
176. Шульгин И. А., Климов С. В., Ничипорович А. А. Об адаптации архитектуры растений к солнечной радиации.— Физиол. раст., 1975, т. 22, вып. 1, с. 40—48.
177. Щербаков Ю. А. Поступление и отражение прямой солнечной радиации на неодинаково ориентированных склонах в разных условиях.— Уч. зап. Перм. ун-та, 1970, № 240, с. 100—133.
178. Янишевский Ю. Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений.— Л.: Гидрометеоиздат, 1957.— 415 с.
179. Allen L. H., Jr. Model of light penetration into a widerow crop.— Agron. J., 1974, vol. 66, N 1, p. 41—47.
180. Anderson M. C. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis.— J. Appl. Ecol., 1966, vol. 3, N 1, p. 41—45.
181. Anderson M. C., Miller E. E. Forest cover as a solar camera: penumbra effects in plant canopies.— J. Appl. Ecol., 1976, vol. 11, N 2, p. 691—697.
182. Baumgartner A. Meteorological approach to the exchange of CO₂ between the atmosphere and vegetation, particularly forest stands.— Photosynthetica, 1969, N 3 (2), p. 127—149.
183. Baumgartner A. Einfluss energetischer Faktoren auf Klima, Produktion und Wasserumsatz in bewaldeten Einzugsgebieten.— In: Plenarvortrag, 15. JHFRO-Congress in Gainesville (Fla). Gainesville, 1971, p. 75—89.
184. Baumgartner A. Climatic variability and forestry.— In: Proc. World. Clim. Conf.: Conf. Experts Clim. and Mankind. Geneva, 1979, p. 581—607.
185. Becker M. Une technique nouvelle d'utilisation des photographies hemispheriques pour la mesure du microclimat lumineux en foret.— Ann. Sci. forest., 1971, N 23(4), p. 425—442.
186. Bergen J. D. Windspeed distribution in and near an isolated, narrow forest clearing.— Agr. Meteorol., 1976, vol. 17, N 2, p. 111—133.
187. Blackman G. E. Statistical and ecological studies in the distribution of species in plant communities. I. Dispersion as a factor in the study of changes in plant population.— Ann. Bot., 1942, vol. 3, N 6, p. 351—370.
188. Blanckmeister J. Die räumliche und zeitliche Ordnung im Walde des mitteleuropäischen Raumes.— Neumann Verlag, Leipzig, 1956.— 145 S.
189. Brown H. E., Worley D. P. Some application of the canopy camera in forestry.— J. For., 1965, vol. 63, N 9, p. 674—680.

190. Bruce H., Forster R. B. Energy flow through litter in Panamanian forest.— J. Ecol., 1977, vol. 65, N 1, p. 147—155.
191. Buffo J., Fritschen L. J., Murphy J. L. Direct solar radiation on various slopes from 0 to 60 degrees north latitude.— U. S. Dept. Agr., Forest. Serv., Pacific Northwest Forest Range Expt. Sta., Res. Pap., PNW-142, 1972.— 77 p.
192. Bunnik J. J. The multispectral reflectance of short-wave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties.— Wageningen, 1978.— 180 p.
193. Charles-Edwards D., Thorley J. H. M. Light interception by an isolated plant—a simple model.— Ann. Bot., 1973, vol. 37, p. 919—228.
194. Charles-Edwards D., Thorpe M. R. Interception diffuse and direct-beam radiation by hedgerow apple orchard.— Ann. Bot., 1976, vol. 40, N 167, p. 603—613.
195. Chartier Ph., Beecker M. et al. Effects physiologiques et caracterisation du rayonnement solaire dans le cadre d'une methode d'aménagement sylvicole en foret dense africaine.— Bois et forest trop., 1973, N 152, p. 19—35.
196. Daniels R. F. Spatial patterns and distance distributions in young seeded loblolly pine stands.— For. Sci., 1978, vol. 24, N 2, p. 260—266.
197. Denslow J. S. Gap partitioning among tropical rainforest trees.— Biotropica, 1980, vol. 12, N 2, c. 47—55.
198. Dice L. R. Measures of the amount of ecological association between species.— Ecology, 1945, N 26, p. 297—302.
199. Duckrey M. Utilization of hemispherical photographs to calculate solar radiation permeability of forest canopies. II. Experimental study.— Ann. Sci. Forest., 1975, N 32(4), p. 205—221.
200. Duncan W. G. et al. A model for simulating photosynthesis in plant communities.— Hilgardia, 1967, vol. 38, N 4, p. 181—205.
201. Dykyjova D. Productivity and solar conversion in reed swamp stands in comparison with outdoor mass cultures of algae in the temperature climate Central Europe.— Photosynthetica, 1971, N 5(1), p. 329—340.
202. Eberhardt L. L. Some developments in distance sampling.— Biometrics, 1967, vol. 23, p. 207—216.
203. Emmingham W. H., Waring R. H. Conifer growth under different light environments in the siskiyou Mountains of south western Oregon.— Northwest Sci., 1973, vol. 47, N 2, c. 88—99.
204. Evans G. C., Coombe D. E. Hemispherical and woodland canopy photography and light climate.— J. Ecol., 1959, vol. 47, p. 103—113.
205. Gay L. W., Knoerr K. R. Forest radiation budget.— School For., Duke Univ. Durham, N. C. Bull. 1973, N 19, vol. 165.
206. Gay L. W., Knoerr K. R., Braaten M. O. Solar radiation variability on the floor of a pine plantation.— Agr. Meteorol., 1971, vol. 8, N 1, p. 39—50.
207. Garnier B. J., Ohmura A. A method of calculating the direct short-wave radiation income of slopes.— J. Appl. Meteorol., 1968, N 7, p. 796—800.
208. Gates D. M. Energy plants and ecology.— Ecology, 1965, N 4, p. 1—13.
209. Gates D. M. Radiant energy, its receipt and disposal. Meteorol.— Monogr., 1965, N 6 (28), p. 1—28.
210. Gausman H. W., Allen W. A. Optical parameters of leaves of 30 plant species.— Plant. Physiol., 1973, vol. 52, N 1, p. 57—62.
211. Gosz J. R., Holmes R. T. et al. The flow of energy in a forest ecosystem.— Sci. Amer., 1978, vol. 238, N 3, p. 93—102.

212. Goudriaan J. Crop micrometeorology: a simulation study.—Wageningen, Pudoc, 1977.—249 p.
213. Federer C. A. Solar radiation absorption by leafless hardwood forests.—*Agr. Meteorol.*, 1971, vol. 9, N 1—2, p. 3—20.
214. Fons W. J., Bruce H. D., McMaster A. Mables for estimating direct beam solar irradiation on slopes at 30 to 46° latitude.—U. S. Dept. Agr., Forest. Serv., Pacific Southwest Forest Range Expt. Sta., 1960.—298 p.
215. Frank E. C., Lee R. Potential solar beam irradiation on slopes; tables for 30 to 50° latitude.—U. S. Dept. Agr., Forest Serv., Rocky Mountain Forest Range Expt. Sta. Res. Pap. RM-18, 1966.—118 p.
216. Fuggle R. A. A computer programme for determining direct short-wave radiation income on slopes.—Mc Hill University Montreal, 1970.
217. Hilson P. O. The energy balance in Swedish forestry.—*Ecol. Bull.*, 1976, N 21, p. 95—101.
218. Holgate P. Some new tests of randomness.—*J. Ecol.*, 1965, vol. 53, N 2, p. 261—266.
219. Honda H. Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body: effects of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body.—*J. Theor. Biol.*, 1971, vol. 31, N 2, p. 331—338.
220. Hopkins B. A new method of determining the type of distribution of plant individuals.—*Ann. Bot.*, 1954, N 18, p. 213—226.
221. Horn H. S. The adaptive geometry of trees.—Princeton, N. Y., Univ. Press, 1971.—144 p.
222. Hutchison B. A., Matt Dettlef R. Beam enrichment of diffuse radiation in a deciduous forest.—*Agr. Meteorol.*, 1976, vol. 17, N 2, p. 93—110.
223. Hutchison B. A., Matt Dettlef R. The distribution of solar radiation within a deciduous forest.—*Ecol. Monogr.*, 1977, vol. 47, N 2, p. 185—207.
224. Jackson R. J. The effect of slope, aspect and albedo on potential evapotranspiration from hillslopes and catchments.—*N. Z. J. Hydrol.*, 1967, N 6, p. 60—69.
225. Jarvis P. C., James G. B., Landsberg J. J. Coniferous forest.—In: *Vegetation and the atmosphere, Case studies*. L. Acad. Press., 1976, vol. 2, p. 171—240.
226. Kinerson R., Jr., Fritschen L. J. Modelling a coniferous forest canopy.—*Agr. Meteorol.*, 1971, vol. 8, N 6, p. 439—445.
227. Kuroiwa S., Monsi M. Theoretical analysis of light factor and photosynthesis implant communities (2).—*J. Agr. Meteorol.*, 1963, vol. 19, N 1, p. 15—21.
228. Kuroiwa S. A new calculation method for total photosynthesis of a plant community under illumination consisting of direct and diffused light.—In: *Funct. Terrest. Ecosyst. at the Primary Prod. Level*. Paris. UNESCO, 1968, p. 391—398.
229. Kuroiwa S. Theoretical analysis of light factor and photosynthesis in plant communities (3). Total photosynthesis of a foliage under parallel light in comparison with that under isotropic conditions.—*J. Agric. Meteorol.*, Tokyo, 1968, N 24, p. 75—90.
230. Lee R. Evaluation of solar beam irradiation as a climatic parameter of mountain watersheds.—*Color Univ., Hydrol. Pap.* N 2, 1963.—50 p.
231. Lee R., Baumgartner A. The topography and insolation climate of a mountainous forest area.—*Forest Sci.*, 1966, N 1, p. 258—267.
232. Lee R., Sypolt C. R. Toward a biophysical evaluation of forest site potential.—*Forest Sci.*, 1974, vol. 20, N 2, p. 145—154.
233. Lemeur R., Blad B. L. A critical review of light models for estimating the short-wave radiation of plant canopies.—*Agr. Meteorol.*, 1974, vol. 14, N 1—2, p. 255—286.
234. Mann J. E., Curry G. L. A sunfleck theory for general foliage, location distributions.—*J. Math. Biosci.*, 1977, N 5, p. 87—97.
235. Mann J. E., Curry G. L. et al. A general law for direct sunlight penetration.—*Math. Biosci.*, 1977, N 34, p. 63—78.
236. Mann J. E., Curry G. L., Sharpe P. J. H. Light interception by isolated plants.—*Agr. Meteorol.*, 1979, N 20, p. 205—214.
237. Mawson J. C. A Monte Carlo study of distance measures in sampling for spatial distribution in forest stands.—*For. Sci.*, 1968, vol. 14, N 2, p. 127—139.
238. Miller E. E., Norman J. M. A sunfleck theory for plant canopies. II. Penumbra effect: Intensity distributions along sunfleck segments.—*Agron. J.*, 1971, vol. 63, N 5, p. 739—743.
239. Miller Ph. C. Solar radiation profiles in openings in canopies of aspen and oak.—*Sci.* 1969, N 3877, p. 308—309.
240. Monsi M., Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion.—*Jap. J. Bot.*, 1953, vol. 4, N 5, p. 22—52.
241. Monsi H. Mathematical model of plant communities.—In: *Funct. Terrest. Ecosyst. at the Primary Prod. Level*, Paris, UNESCO, 1968, p. 131—150.
242. Monsi M., Uchijima Z., Oikawa T. Structure of foliage canopy and photosynthesis.—*Ann. Rev. Ecol. Systematics*, 1973, p. 301—327.
243. Monteith J. L. Radiation and crops.—*Experim. Agric. Rev.*, 1965, N 1, p. 241—251.
244. Morisita M. Estimation of population density by spacing method.—*Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ.*, 1954, E, N 1, p. 187—197.
245. Morisita M. Measuring of the dispersion of individuals and analysis of distribution patterns.—*Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. Biol.* 1959, vol. 16, N 4, p. 215—235.
246. Mountford M. D. On E. C. Pielow's index of non-randomness.—*J. Ecol.*, 1961, N 49, p. 271—275.
247. Mototani J. Horizontal distribution of light intensity in plant communities.—In: *Photosynthesis and utilization of solar energy. Level III. Experiments*. Tokyo, 1966—1967.
248. Murphy C. E., Knoerr K. R. Modelling the energy balance processes of natural ecosystems.—*East. Deciduous For. Biom. J. B. P.* 72-10, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge Tenn. 1972.
249. Neuman J. R., Remmaenga E., Reller H. Snow distribution in relation to solar radiation on two Swiss pre-Alp watersheds.—*Water Resources Res.*, 1976, vol. 7, p. 1636—1640.
250. Newton J. E., Blackman G. E. The penetration of solar radiation through leaf canopies of different structure.—*Ann. Bot.*, 1970, vol. 34, N 135, p. 329—348.
251. Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands.—*Agr. Meteorol.*, 1971, vol. 7, N 8, p. 25—38.
252. Norman J. M., Jarvis P. G. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). III. Measurements of canopy structure and interception of radiation.—*J. Appl. Ecol.*, 1974, vol. 11, p. 375—398.
253. Norman J. M., Jarvis P. G. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). V. Radiation penetration theory and test case.—*J. Appl. Ecol.*, 1975, vol. 12, N 3, p. 839—878.

254. Norman J. M., Miller E. E., Tanner C. B. Light intensity and sunfleck-size distributions in plant canopies.—Agron. J., 1971, vol. 63, N 5, p. 743—748.

255. Oikawa T., Saeki T. Light regime in relation to plant population geometry. I. A Monte Carlo simulation light microclimates within a random distribution foliage.—Bot. Mag., Tokyo, 1977, vol. 90, N 1017, p. 1—10.

256. Oikawa T. Light regime in relation to plant population geometry. II. Light penetration in a square-planted population.—Bot. Mag., Tokyo, 1977, vol. 90, N 1017, p. 11—22.

257. Oikawa T. Light regime in relation to plant population geometry. III. Ecological implications of a square-planted population from the viewpoint of utilization efficiency of solar energy.—Bot. Mag., Tokyo, 1977, vol. 90, N 1020, p. 301—311.

258. Ovington J. D., Madgwick H. A. J. Comparison of light in different woodlands.—Forestry, 1955, vol. 28, p. 141—146.

259. Ovington J. D., Heitkamp D. The accumulation of energy in forest plantations in Britain.—J. Ecol., 1960, vol. 48, p. 639—646.

260. Papp L. B. Caloric values of dominant species in an oak forest (*Quercetum petraeae-cerris*) near Sikfokut, North Hungary.—Acta bot. Acad. sci. hung., 1975 (1976), vol. 21, N 3—4, p. 347—352.

261. Payandeh B. Comparisons of methods for assessing spatial distribution of trees.—For. Sci., 1970, N 16, p. 312—317.

262. Payandeh B. Spatial pattern of trees in the major forest types of northern Ontario.—Can. J. For. Res., 1974, N 4, p. 8—14.

263. Persson O. Distance methods. The use of distance measurements in the estimation of seeding density and open space frequency.—Studia Forestaria Suecica, 1964, N 15, p. 1—18.

264. Pieloux E. C. A single mechanism to account for regular, random and aggregated populations.—For. Sci., 1960, vol. 48, p. 575—584.

265. Pisek A., Winkler E. Licht und Temperaturabhängigkeit der CO₂-Assimilation von Fichte (*Picea excelsa* Link), Zibire (*Pinus cembra* L.) und sonnenblume (*Helianthus annuus* L.).—Planta, 1959, vol. 53, H. 5.

266. Reader R. J. Photosynthetic period length for the woody plants of two deciduous forest sites.—Can. Field. Nature, 1976, vol. 90, N 1, p. 47—52.

267. Reifsnyder W. E., Furnival G., Horowitz J. L. Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies.—Agric. Meteorol., 1971, N 9, p. 21—37.

268. Reifsnyder W. E., Lull H. W. Radiant energy on relation to forests.—Washington, 1965.—111 p.

269. Reimer A., Desmarais R. Micrometeorological energy budget methods and apparent diffusivity for boreal forest and grass sites at Pinawa, Manitoba, Canada.—Agr. Meteorol., 1973, N 11, p. 419—436.

270. Riemenschneider V. L., Gilbert C. E. Interception of solar radiation by three deciduous forest communities in Neotoma, a valley in south-central Ohio.—Phio J. Sci., 1975, N 77 (5), p. 231—235.

271. Rouse W. R., Wilson R. G. Time and space variations in the radiant energy fluxes over sloping forested terrain and their influence on seasonal heat and water balances at a middle latitude site.—Geogr. Ann., Ser. A., Phys. Geogr., 1969, vol. 51, p. 160—175.

272. Roussel L. Etat actuel de la photologie forestiere.—Revue Forest. Franc., 1962, vol. 14, N 1, p. 1—13.

273. Roussel L. Les radiations et la foret.—Bull. trimestr. soc. forest. Franche-Comte et prov. Est., 1967, vol. 33, N 5, p. 144—156.

274. Runge M. Energieumsätze in den Biozönosen terrestrischer Ökosysteme.—Scripta geobot., 1973, Bd. 4.—116 S.

275. Saeki T. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in plant community.—Bot. Mag., Tokyo, 1960, N 860, p. 55—63.

276. Seybold A. Über den Lichtgenuß der Sonnen- und Schattenpflanzen.—Ber. Dtsch. bot. Ges., 1934, Bd. 52, H. 9.

277. Seybold A. Über den Lichtfactor photophyslogischer Prozesse.—Jahrb. wiss.—Bot., 1936, Bd. 82, H. 5.

278. Schomaker C. E. Solar radiation measurements under a spruce and a birch canopy during May and June.—For. Sci., 1968, vol. 14, p. 31—38.

279. Schulze E. D., Fuchs H. J., Fuchs H. Spatial distribution of photosynthetic capacity and performance in a mountain spruce forest of Northern Germany. I. Biomass distribution and daily CO₂ uptake in different crown layers.—Ecologia, 1977, vol. 29, N 1, p. 43—61.

280. Suits G. H. The calculation of the direction reflectance of a vegetative canopy.—Remote Senc. Environ., 1972a, vol. 2, N 2, p. 117—125.

281. Sweits Rdi Arno. Estudo da variacao da radiacao solar, temperatura e umidade relativa do ar no interior de uma matade Araucaria angustifolia em relacao ao terreno livre.—Fluoresto, 1976, vol. 7, N 2, p. 36—45.

282. Swift L. Jr. Effect of forest cover and mountain physiography on the radiant energy balance.—Duke Univ., D. F., 1972, p. 87.

283. Tadaki J. Studies production structure of forest. Some studies on leaf amount of stands and individual trees.—J. Jap. For. Soc., 1963, vol. 45, p. 249—256.

284. Tamai Shigenobu. Studies on the stand structure and light climate. II. Methods of investigating the sunfleck on the forest floor. 1.—Bull. Kyoto Univ. Forests, 1976, N 48, p. 69—79.

285. Tanaka S. Estimation of sunlit leaf area in tobacco plant community by the Monte Carlo method. Estimation on direct sunlight.—In: Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III Experiments 1968. Tokyo, 1968, p. 76—79.

286. Vowinckel T., Oechel W. C., Boll W. G. The effect of climate on the photosynthesis of picea mariana at the subarctic tree line. 1. Field measurements.—Can. J. Bot., 1975, N 53, p. 604—620.

287. Waggoner P. E., Furnival G. M., Reifsnyder W. E. Simulation of the microclimate in a forest.—For. Sci., N 15 (1), 1969, p. 37—45.

288. Warren Wilson J. Point quadrat analysis of foliage distribution for plants growing singly or in rows.—Aust. J. Bot., 1965, vol. 13, p. 405—409.

289. Warren Wilson J. Stand structure and light penetration. I. Analysis by point quadrat.—J. Appl. Ecol., 1965, vol. 2, N 2, p. 383—390.

290. Warren Wilson J. Stand structure and light penetration. III. Sunlit foliage area.—J. Appl. Ecol., 1967, vol. 4, p. 159—165.

291. Wassink E. C. Efficiency of light energy conversion in plant growth.—Plant. Physiol., 1959, vol. 34, p. 356—361.

292. Wiesner J. Der Lichtgenuss der Pflanzen.—Leipzig, 1907.

293. William a. Williams. Range improvement' as related to net productivity, energy flow and foliage configuration.—J. Rand. Management, 1966, vol. 19, N 1.

294. Williams C. N., Kwi S. N. A simple foliage model for studing light penetration.—Ann. Bot., 1967, N 31 (124), p. 159—165.

295. Winter S. R., Ohlrogge A. J. Leaf angle, leaf area, and corn (Lea mays L.) yields.—Agron. J., 1973, vol. 65, p. 395—398.

296. De Wit C. T. Photosynthesis of leaf canopies.—Agric. Res. Rep., 1965, N 663, p. 1—57. (Wageningen, Pudoc.)

297. De Wit C. T., Goudriaan J. Simulation of ecological processes.—Wageningen., Pudoc, 1974.— 159 p.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Ажурность крон 84, 85, 166
- , лиственные породы 133
- , хвойные породы 133, 166
- полога 84, 85, 158—160, 165, 168
- , лиственные леса 135
- , темнохвойные леса 135, 168
- , зависимость от азимута 136, 137
- , зависимость от зенитного угла 133, 137, 138
- Азимут склона 155, 176, 178, 198, 212, 219, 222
- Солнца 14, 142
- проекции нормали к склону на горизонтальную поверхность 14, 142
- Альbedo ФАР 141, 186, 187
- ИНТ радиации 141, 186, 187
- леса 186, 188, 196
- травостоя 187, 188, 196
- в горных условиях 140, 141, 187, 188

Б

- Баланс
- коротковолновый 185, 189, 190, 196, 197
- длинноволновый 196, 197
- полный радиационный 60, 171, 195, 218, 226, 232
- горизонтальной поверхности 60, 61, 63, 218
- наклонной поверхности 61, 196, 197, 200, 201
- леса 63, 196, 197, 199, 201
- травостоя 63, 196, 197, 199, 201

В

- Взаимодополняемость (взаимозаменяемость) видов 206, 225, 230
- Возобновление естественное древесных пород
- на открытых склонах 201, 207, 210, 211, 236
- под пологом леса 201, 207—212, 236
- и сомкнутость полога 212—213
- и условия радиации 201, 207, 210—213
- Высота над уровнем моря 28, 37, 48, 52, 65, 67, 70, 73, 76—79, 200, 219—222, 225
- РП 142, 150—151
- Солнца 36, 54, 71, 77, 139, 141, 143, 146, 149—151, 153, 156, 179

Г

- Градиент(ы) вертикальный прямой радиации при безоблачном небе 26, 27, 78
 — при действительных условиях облачности 67, 71, 79
 — суммарной радиации при безоблачном небе 28—29, 78
 — под пологом леса 184, 185, 189, 237
 — прозрачности атмосферы 17, 27, 28
 — межширотный 26, 30, 31, 34, 36, 53, 60, 63, 65, 76, 78—79, 81, 181, 191, 237

И

- Индекс Морисита 90—93
 —, лиственные леса 100, 102, 103
 —, темнохвойные леса 100, 106—108, 111, 112
 — перекрытия крон 126
 —, лиственные леса 126, 127
 —, темнохвойные леса 126, 127, 129, 161
 —, для древостоя в целом 127, 128
 — для различных ярусов 127—129
 — сухости Будыко 232—233

К

- Конкуренция внутривидовая 109, 118, 122, 123, 211, 230
 — межвидовая 109, 110, 117, 118, 210—214, 225, 228
 Контрасты радиационные между склонами различной крутизны
 —, открытые склоны 32, 34, 53, 57, 60, 62, 67, 74, 77—80, 180—182, 195, 236
 —, под пологом леса 180—182, 195, 236
 — межэкспозиционные, открытые склоны 34, 35, 37, 53, 57, 60, 62, 67, 74, 77—80, 180—182, 236
 —, под пологом леса 180—182, 236
 — экстремальные, открытые склоны 35, 53, 57, 60, 62, 67, 74, 77—79, 81, 180—182, 237
 —, под пологом леса 180—182, 192, 203, 237
 Коэффициент
 — агрегации Хопкинса 91, 93, 94
 —, лиственные леса 99, 100, 103—105
 —, темнохвойные леса 106—108, 110—112
 — ослабления прямой радиации облачностью 39, 40
 — суммарной радиации облачностью 39, 40—42, 178, 237
 — переходный от горизонтальной поверхности к наклонной для прямой радиации при безоблачном небе 21, 24, 30, 33, 37
 — при действительных условиях облачности 55, 56, 73
 — для суммарной радиации при безоблачном небе 24, 25, 33, 37
 — при действительных условиях облачности 57, 58, 73
 — для радиационного баланса 61, 62
 — и высота Солнца 73
 — и склонение Солнца 55, 58, 73
 — и широта 55, 58, 73, 79
 — для открытых склонов 55, 58, 145
 — под пологом горных лесов 145
 — устойчивости ясной погоды 20, 65
 — пасмурной погоды 20, 65
 — экстинкции 83

М

- Метод Ипатова 89
 — Плотникова 87, 88, 127
 — полусферических фотографий 84, 147—152, 161
 — пробного круга 87, 108, 110—112
 — точка—растение и растение—растение 91, 94, 109

О

- Облачность
 —, вертикальные градиенты 45, 46, 48, 65, 73°
 —, региональные характеристики 40, 42, 45—48, 49, 51, 64, 69, 146
 —, сезонный ход 45—49, 51, 64
 —, суточный ход 46—48, 53, 54, 146
 Объем кроны 124, 125
 Относительная дисперсия 91, 92, 101, 103—106, 153, 162
 — площадь листьев 83, 153, 160, 171, 199
 — толщина полога 142—144, 148, 153, 156, 158

П

- Прозрачность атмосферы, приведенная к относительной массе атмосферы, равной 2 16—21
 —, вертикальные градиенты 27, 28, 65
 —, региональные характеристики 17, 27, 28, 30, 49, 65

Р

- Радиация
 — прямая 14, 18, 19, 26, 27, 43, 48, 49, 51, 66, 69, 71, 148, 153, 167, 169, 223—225
 — рассеянная 22—25, 28, 37, 38, 51, 70, 148, 153, 162, 164, 167—169
 — суммарная 22, 23, 29, 44, 48, 56, 66, 69, 71, 167, 218, 219, 223
 — БИКР 9, 153
 — ИНТ 9, 48, 77, 151, 153, 165, 166, 218, 223, 232
 — ФАР 9, 48, 49, 51, 63, 66, 74—76, 78, 146, 151, 153, 165—168, 190, 203, 209, 212
 — для открытых склонов при безоблачном небе и азимут склона 22, 30, 32, 34, 35, 49, 50, 65
 — и высота над уровнем моря 37, 48, 52, 65
 — и высота Солнца 36
 — и крутизна склона 22, 23, 30, 32, 34, 35, 50, 65
 — и склонение Солнца 22, 30, 32, 34, 35, 49, 50, 65
 — и широта 22, 30, 32, 34, 35, 65
 — при действительных условиях облачности и азимут склона 52, 54, 56, 65, 67, 71, 79—80
 — и высота над уровнем моря 48, 67, 70, 76—79
 — и высота Солнца, 54, 71, 77
 — и крутизна склона 52, 54, 56, 67, 71, 79—80, 195
 — и склонение Солнца 59, 67
 — и широта 59, 67, 78—79
 — под пологом 145, 149, 151, 153, 154, 162, 167, 178—184, 203, 209, 213
 — лиственных лесов 155, 163—166, 170, 171, 176, 179—181, 183, 195
 — светлых лесов 165, 166, 176
 — темнохвойных лесов 155, 161, 163, 165, 166, 168, 170, 172, 173, 176, 179—181, 183, 209, 213

Радиационные ниши

- видов 206, 215, 223—227, 233
- групп формаций 227—231
- классов ассоциаций 228—231
- формаций 223, 228, 233
- пересечение 206, 225, 227, 230, 232

Размещение особей

- , влияние факторов абиогенных 87, 94, 99, 117—119, 172, 192
- , — биогенных 87, 117—119
- , — взаимного затенения 86, 121—123, 126
- для различных ярусов, всходы 64
- , —, древостой 85, 87, 113
- , —, господствующий ярус *100, 103, 107, 113, 115, 119
- , —, подчиненный ярус 100, 101, 103, 105—107, 113, 115—119
- , —, подрост 105, 118
- контагиозное (групповое) 86—89, 102, 111, 113, 116, 192
- регулярное 86—89, 103, 105, 106, 111, 113, 116, 123, 129, 160, 192, 236
- случайное 85—89, 102, 103, 106, 111, 113, 116, 120, 129, 192, 236
- и пропускание радиации 153, 154, 160, 161, 192

Распределение (я)

- коэффициентов направления связи 204, 205, 210, 217, 220, 222—223
- особей, фитоэлементов 86, 159, 168
- отрицательное биномиальное 114
- положительное биномиальное 114, 115
- пуассоновское 86, 107, 108, 111, 113—114, 153
- просветов в пологе 86, 145, 148, 155, 156, 168, 172
- азимутальная зависимость 136—138, 162
- зависимость от зенитного угла 83, 135—138, 162, 168
- лиственных лесов 135—138
- темнохвойных лесов 135—138
- функций пропускания Пирсона 177, 192
- эмпирические 146, 147, 172, 174—177, 192
- при различных высотах Солнца 172, 173, 175, 176
- при различных условиях облачности 172—173, 177

С

Сквозистость полога (см. *Ажурность полога*)

Сомкнутость крон 126

- полога 83, 126, 140, 145, 146, 227
- и ажурность полога 134—136, 158, 235
- и индекс перекрытия 126, 161
- и пропускание радиации 158, 161, 165—167, 169, 172, 173, 176, 182—183, 189, 212, 213, 235

Сопряженность

- автосопряженность 120, 121
 - взаимосопряженность 120, 121
 - мера (коэффициент) сопряженности 120, 134, 219, 226
 - нормированная мера сопряженности 120, 167, 168, 217, 227
- #### Сукцессия 190, 191, 193, 201, 208, 215

Т

Толерантность 117, 210, 216, 217, 219, 226, 230

Типы кривых распределения пропускания 176—177

У

- Угол наклона склона 83, 142, 145, 176, 212, 219, 221, 222
- фитоэлементов 83

Ф

Функции

- перекрытия крон 129, 160, 161, 167
- , лиственные леса 129, 130, 131
- , темнохвойные леса 129, 130, 155, 161
- , в пределах одного яруса 130, 131
- для всего древостоя 130, 131
- поглощения радиации 147, 185, 192, 236
- , лиственные леса 188—191
- , темнохвойные леса 188, 189, 191
- , травостой 190, 193—195
- пропускания 141, 192
- прямой радиации 147, 148, 152, 153, 160
- , лиственные леса 150, 156—158, 160, 162
- , темнохвойные леса 150, 156—161
- рассеянной радиации 143, 147, 148, 152
- , лиственные леса 151, 163—166
- , темнохвойные леса 151, 163—166, 168
- суммарной радиации 151, 167
- , лиственные леса 168, 169, 170, 206
- , травостой 195
- , темнохвойные леса 168—170, 172, 173, 206
- , сезонный ход 48, 158, 165, 171, 178—181, 193, 195
- , суточный ход 143, 151, 154, 156, 165, 172, 173, 178—181, 193
- пространственной ориентации фитоэлементов 83, 84, 153, 154, 159, 160, 167

Э

Эффект полутени 148—150

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редакторов	3
Основные обозначения, используемые в книге	6
Введение	8
Глава I. Закономерности прихода радиации к верхней границе растительного покрова в условиях горного рельефа	13
I.1. Общие замечания	13
I.2. Методика расчета прямой и суммарной радиации на произвольно ориентированную поверхность	14
I.2.1. Прямая радиация при безоблачном небе	14
I.2.2. Суммарная радиация при безоблачном небе	22
I.3. Вертикальные градиенты возможных сумм радиации	26
I.4. Приход радиации на наклонные поверхности в интервале широт 41—53° при безоблачном небе	30
I.5. Приход радиации при средних многолетних условиях облачности	39
I.5.1. Оценка влияния облачности при расчете действительных сумм радиации	39
I.5.2. Региональные особенности радиационного режима при действительных условиях облачности	48
I.6. Обсуждение результатов	76
Глава II. Структура горных фитоценозов	82
II.1. Общие замечания	82
II.2. Пространственное размещение деревьев	86
II.2.1. Некоторые методические вопросы изучения типа пространственного размещения	86
II.2.2. Тип размещения деревьев в равнинных и горных лесах	94
II.2.3. К вопросу о причинах формирования различных типов размещения деревьев	117
II.3. Структура полога крон древесного яруса	124
II.3.1. Сомкнутость полога и крон	124
II.3.2. Ажурность крон и полога древесного яруса	132
Глава III. Ослабление радиации пологом древесного яруса горных лесов	139
III.1. Особенности методики фитоактиометрических исследований в горных лесах	139
III.1.1. Измерения отраженной радиации	140
III.1.2. Определение пропускания радиации	141

III.1.3. Фотографический метод изучения пропускания радиации	147
III.2. Пропускание радиации пологом горных лесов	153
III.2.1. Прямая радиация	153
III.2.2. Рассеянная радиация	162
III.2.3. Суммарная радиация	167
III.3. Пространственно-временная изменчивость радиационного поля под пологом леса	171
III.4. Влияние лесной растительности на приход радиации в условиях горного рельефа	177
III.4.1. Суммы радиации под пологом древесного яруса	178
III.4.2. Поглощение радиации деятельным слоем растительного покрова	186
III.5. Обсуждение результатов	191
Глава IV. Закономерности формирования нижних ярусов лесных ценозов при различных условиях радиации	203
IV.1. Общие замечания	203
IV.2. Влияние ФАР на подрост хвойных пород под пологом горных лесов Дальнего Востока	207
Глава V. Влияние радиации на пространственную дифференциацию растительности	215
V.1. Общие замечания	215
V.2. Влияние климатических параметров на видовой состав древесного яруса	216
V.3. Радиационные ниши некоторых древесных пород	219
V.4. Радиационные ниши растительных сообществ	227
V.5. Совместное влияние тепла и влаги на высотнo-поясную дифференциацию растительности	232
Заключение	234
Список литературы	239
Предметный указатель	255

