

МЕТОДИКА БОТАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК (018) : 581.9

В. С. Ипатов, Л. А. Кирикова, В. П. Бибиков

СКВОЗИСТОСТЬ ДРЕВОСТОЕВ (ИЗМЕРЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОД ПОЛОГОМ ЛЕСА)

V. S. IPATOV, L. A. KIRIKOVA, V. P. BIBIKOV. THE VALUE OF
TRANSPARENCE OF A WOODSTAND, ITS MEASUREMENT AND THE POSSIBILITY OF ITS
USAGE AS AN INDEX OF MICROCLIMATIC CONDITIONS UNDER A FOREST CANOPY

Предлагается способ определения сквозистости древостоев с помощью сконструированного авторами прибора. Отмечена перспективность использования сквозистости как интегрального показателя микроклиматических условий под пологом леса.

При исследовании мозаики и динамики напочвенного покрова в лесу возникает широкий круг вопросов, для решения которых необходимо знание микроклиматических особенностей исследуемых участков. Как известно, такие показатели, как интенсивность светового потока, температура и влажность воздуха, крайне подвижны, меняются в течение суток и подвергаются сильным колебаниям в зависимости от характера погоды. Поэтому их учет для получения надежных и сравнимых результатов следует производить в большом количестве точек и одновременно. Если исследованием охвачено несколько десятков, не говоря уже о сотнях, участков, инструментальный учет светового и температурного режимов становится крайне сложным.

Косвенным показателем экологической обстановки под пологом леса может быть сквозистость древостоя.¹ Под сквозистостью мы понимаем суммарную проекцию любых просветов в древостое на мысленную полусферу, ограниченную горизонтом, над любой точкой под пологом леса. Она выражается в процентах от площади полусферы. Существующие фотографические методы определения сквозистости, или ажурности, крон из-за большой трудоемкости не нашли широкого применения в геоботанических исследованиях. Упомянутые в литературе «ажуромеры» и сквозистомеры (Matusz, 1960; Алексеев, 1975) также не распространены.

Для быстрого и, как будет показано далее, достаточно надежного измерения сквозистости авторами предлагается сконструированный в лаборатории геоботаники Биологического института Ленинградского государственного университета прибор (сквозистомер), изображенный на рис. 1. Основным элементом сквозистомера является зеркало с визирной рамкой, прикрепленной под углом 45° к зеркалу. Размер зеркала 10×15 см, оно расчерчено линиями, образующими прямоугольники, площадь которых составляет 5, 10, 15, 20, 25% от площади зеркала. Эти прямоугольники служат шкалой при определении сквозистости. Визирная рамка представляет собой трапецию со сторонами 14.2 и 11.5 и высотой 6.7 см. Расстояние между центром зеркала и плоскостью визирной рамки составляет 4.5 см.

¹ Естественно, этот показатель не может быть абсолютно полноценным эквивалентом инструментально измеренных освещенности и температуры; при многих специальных исследованиях подобная замена вряд ли допустима.

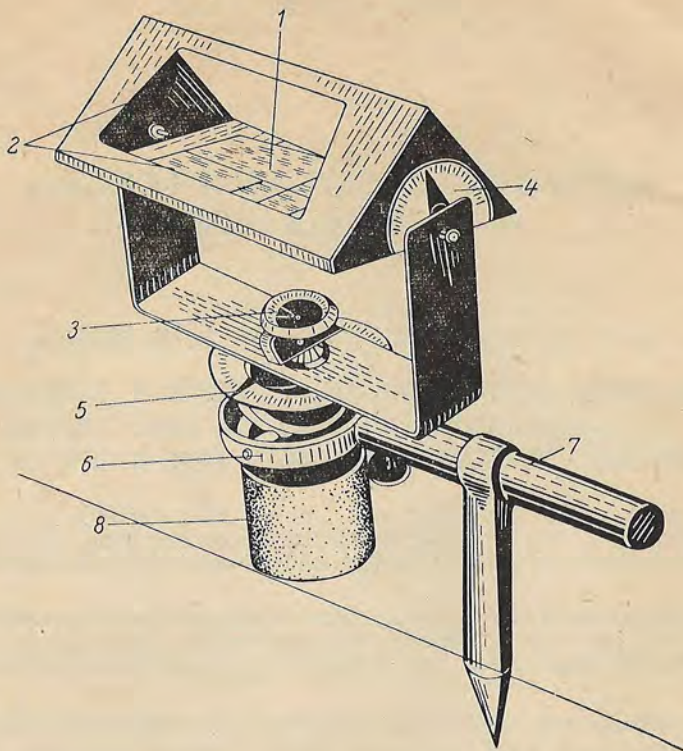


Рис. 1. Сквозистомер.

1 — зеркало с масштабной сеткой, 2 — визирная рамка, 3 — компас, 4 — указатель угла наклона (высоты), 5 — лимб (указатель азимута), 6 — карданная подвеска, 7 — ручка со съемным опорным колом, 8 — груз.

Если смотреть одним глазом через визирную рамку на зеркало, то последнее вписывается в рамку при расстоянии глаза от центра зеркала, равном 28—30 см. При этом угол обзора по большой оси зеркала (по азимуту) равен примерно 28—30, а по малой оси (высоте) — 14—16°. Использование комбинации рамки с зеркалом обеспечивает постоянство углов обзора, а вместе с карданной подвеской — и достаточно точное наведение прибора по азимуту и высоте. Размер зеркала и заданные углы могут быть и иными. Удобным в работе, по-видимому, будет портативный сквозистомер с размером зеркала 6,5×9 см и расстоянием при визировании глаза от центра зеркала в 15 см, что обеспечит углы обзора по большой и малой осям соответственно 30 и 20°.

Теперь о выборе направлений, в которых производится измерение сквозистости. Зоной до 15° высоты от горизонта можно пренебречь, так как по нашим и литературным данным (Алексеев, 1975) сквозистость в лесу здесь мало колеблется и в среднем достигает лишь 2—4%. Для того чтобы получить полную характеристику сквозистости по всей части полусферы, находящейся выше 15°, следует замерить ее по 26—30 направлениям. Но, как показал наш опыт, можно существенно сократить число направлений, что приведет, естественно, к экономии времени, сохраняя достаточную точность получения средней сквозистости.

Нами были приняты следующие 16 направлений: высота 25° — азимут 0, 36, 72, 108, 144, 180, 216, 252, 288, 324; высота 55° — азимут 0, 72, 144, 216, 288; высота 90° — азимут 0. Эти 16 направлений охватывают примерно 60% полусферы (при исключении из нее зоны до 15°). Чтобы оценить надежность получаемых результатов, было проведено сравнение средних из 16 измерений со средними из 32, которые охватывают практически всю принятую часть полусферы и рассматриваются как средние генеральной совокупности. Ошибка средних из 16 измерений вычислялась

с поправкой на генеральную совокупность. Результаты сравнения приведены в табл. 1. Оказалось, что разница между сравниваемыми величинами незначительна и статистически недостоверна, что свидетельствует об очень хорошей представительности принятой выборки в условиях исследуемых древостоев.

ТАБЛИЦА 1

Оценка надежности определения сквозистости (сравнение средних из 16 и 32 измерений)

$\bar{x} \pm S_{\bar{x}} (n=16)$	$\bar{x}_0 (n=32)$	t	$\bar{x} \pm S_{\bar{x}} (n=16)$	$\bar{x}_0 (n=32)$	t
61.6 ± 2.4	59.7	1.1	45.3 ± 2.8	44.5	0.5
56.6 ± 3.4	56.6	0	46.9 ± 3.3	46.4	0.3
52.8 ± 3.6	53.6	0.4	51.9 ± 4.2	52.2	0.1
46.2 ± 2.5	47.2	0.6	60.3 ± 3.9	61.1	0.4
45.0 ± 2.3	45.3	0.2	56.2 ± 3.2	53.4	1.6

Возможны и иные схемы измерения сквозистости; выбор направлений и число их будут определяться как задачами исследования, так и особенностями древостоев. Так, в еловом лесу с равномерным древостоем глухая зона, лишенная значительных просветов, заметно шире по высоте, чем такая же зона в сосняках, что позволяет сократить число направлений при измерении сквозистости. Иногда для данной точки требуется определить сквозистость только в каких-то конкретных направлениях, например в 7 или 13 по ходу солнца.

При исследовании зависимости характера напочвенного покрова от сквозистости в сосновом лесу мы располагаем зеркало сквозистометра на высоте примерно 30 см над почвой (20—25 см над моховым ковром), что позволяет получить среднюю сквозистость для площадки радиусом 50—60 см. При необходимости определить сквозистость для большей площади число точек, в которых следует измерить сквозистость, вычисляется исходя из варьирования сквозистости на данном участке. Так, по нашим данным, на участке елового леса площадью в 1 га, где коэффициент варьирования сквозистости менее 10%, достаточно всего четырех точек для определения сквозистости с относительной ошибкой 5%. В исследуемых нами сосняках сквозистость варьирует больше ($v=18-20\%$), число точек для характеристики средней сквозистости на той же площади возрастает до 15.

Определению сквозистости в природе предшествовала работа с эталонами, что необходимо для выявления возможной субъективной ошибки и для тренировок. Эталоны представляют собой карточки размером 22 × 15 см, на сером фоне которых наклеены кусочки белой бумаги таким образом, что они составляют 5, 10% и так далее вплоть до 95% от площади поля (рис. 2). При определении сквозистости эталон устанавливается в плоскости, параллельной зеркалу. В работе использованы оценки четырех сотрудников.

ТАБЛИЦА 2

Сравнение средних оценок четырех исследователей (\bar{x} , $n=16$) со средним эталоном

Исследователи	Серии										Эталон (\bar{x} , $n=16$)
	\bar{x}_1	отклоне- ние от эталона	\bar{x}_2	отклоне- ние от эталона	\bar{x}_3	отклоне- ние от эталона	\bar{x}_4	отклоне- ние от эталона	\bar{x}_5	отклоне- ние от эталона	
Первый	52.8	+3.4	52.5	+2.8	51.9	+2.2	50.3	+0.6	48.7	-1.0	49.7
Второй	55.3	+5.6	56.6	+6.9	49.4	-0.3	53.4	+3.7	52.8	+3.1	
Третий	50.3	+0.6	50.3	+0.6	51.6	+1.9	51.2	+1.5	49.7	0	
Четвертый	52.8	+3.4	51.9	+2.2	51.2	+1.5	50.6	+0.9	49.1	-0.6	



Рис. 2. Эталоны.

1 — сквозистость 35%, 2 — сквозистость 75%.

Поскольку, как уже указывалось, для определения сквозистости данного участка были приняты 16 направлений, при сопоставлении с эталонами взяты средние оценки авторов из 16 определений (исключены 3 эталона — 25, 50, 80%). Проведено 5 серий замеров, результаты сравнения сведены в табл. 2. Отклонения от эталона не превышают, как правило, 5%; такую ошибку измерения можно признать небольшой.

В табл. 3 показан итог сравнения отдельных (не средних) оценок четырех авторов с эталонами; использовано 100 сопоставлений. Видно, что у большинства авторов свыше 70% определений представляет собой абсолютные совпадения с эталоном плюс случаи расхождения в 5%. Вместе с тем следует иметь в виду, что отдельные измерения сквозистости производятся со значительной ошибкой, снизить которую можно дополнительной тренировкой. Интересно графическое сопоставление оценок сквозистости (рис. 3), которое отражает общую тенденцию всех авторов в характере отклонений их оценок от эталона. Это вызвано, видимо, тем, что при сквозистости до 60—65% исследователь оценивает мозаику открытого неба, а при больших значениях, наоборот, проекцию мозаики крон и переводит ее в сквозистость. Наибольшую трудность представляет оценка сквозистости при ее значениях, несколько больших 50%.

ТАБЛИЦА 3

Сравнение оценок исследователей с эталонами
(процент совпадений от числа сопоставлений, $n=100$)

Исследо- ватели	Абсолютное совпадение, %				
		+ отклонение $\pm 5\%$	+ отклонение $\pm 10\%$	+ отклонение $\pm 15\%$	+ отклонение $\pm 20\%$
Первый	30.5	69.5	88.4	98.9	100
Второй	27.4	52.6	82.1	91.6	96.8
Третий	67.4	93.7	97.9	100	100
Четвертый	49.5	87.4	98.9	100	100

После тренировки на эталонах были проведены измерения сквозистости в лесу с целью определить в реальной обстановке сходимость результатов разных авторов. Четыре сотрудника определяли поочередно сквозистость, прибор устанавливали при одних и тех же высоте и азимуте, запись вели каждый раздельно. Места для измерения выбирали таким образом, чтобы был охвачен весь возможный в исследуемом лесу диапазон сквозистости. Это дало возможность дополнительно выявить, влияет ли на сходимость результатов уровень сквозистости. При сравнении отдельных оценок между авторами наблюдаются расхождения, подобные тем, которые имели место при работе с эталонами. Поскольку же оценкой сквозистости в данной точке служит средняя из 16 направлений, для сравнения были взяты средние арифметические 16 определений. Условными эталонами здесь служили средние из оценок всех авторов (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4

Сравнение сходимости оценок сквозистости

Оценки исследователей				Эталон
\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{x}_4	
15.4	15.3	16.4	13.7	15.2
18.8	17.2	17.6	16.9	17.6
45.3	48.4	46.2	48.4	47.0
46.6	49.1	48.7	50.0	48.6
72.4	79.7	72.7	75.3	75.0
74.7	77.2	74.7	76.2	75.7

Оказалось, что сходимость оценок очень высока, различия оценок исследователей между собой и с эталоном практически не превышают 3% и одинаковы при большой и малой сквозистости. Полученные результаты свидетельствуют о надежности определения сквозистости разными исследователями в виде средней из 16 измерений.

Известно, что количество солнечной радиации, поступающей на поверхность земли из разных зон небесной полусферы, неодинаково, поэтому если рассматривать сквозистость как фактор, определяющий в конечном счете интенсивность и количество приходящей под полог древостоя радиации, то необходимо вводить поправочные коэффициенты для каждого из направлений, в которых измерена сквозистость. Поток радиации из одних и тех же зон меняется в зависимости от времени суток и неодинаков в течение сезона. Естественно, он зависит от широты, на которой расположен район исследования. Видимо, поправочные коэффициенты следует рассчитывать как локальные, характерные только для конкретного района (широты). Возможны разные способы расчета поправочных коэффициентов. Например, можно исходить из суммарных (или средних) за вегетационный сезон потоков радиации (освещенности), приходящих из разных зон небесной полусферы, соответствующих направлениям, по которым измеряется сквозистость. Проще положить в основу для каждой из зон средние значения освещенности за один или несколько дней в сроки, близкие к середине вегетационного периода, что будет соответствовать средней светимости зон при высоте стояния солнца, близкой к средней за сезон. Естественно, точные сроки измерения выдержать сложно, так как необходимо «поймать» в этот период солнечные и пасмурные дни. Надежными, т. е. пригодными, для работы можно признать коэффи-

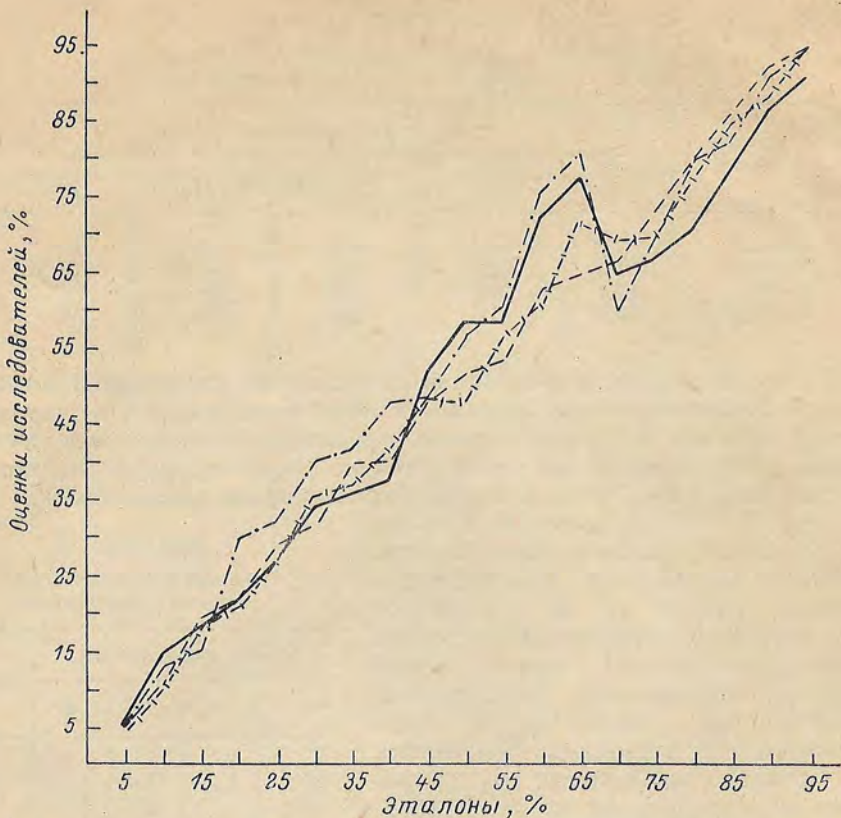


Рис. 3. Сравнение оценок связности, полученных разными исследователями, с эталонами.

циенты в том случае, если «исправленная» ими связность окажется тесно связанной с инструментально измеренной освещенностью. В виде опыта нами использован второй путь. Работа выполнена для района пос. Видлица Карельской АССР на северо-восточном побережье Ладожского озера, где в сосняках исследовалась приуроченность видов мохово-лишайникового и кустарничкового покровов и их комбинаций к условиям микроклимата.

Для выведения поправочных коэффициентов были произведены измерения освещенности люксметром типа Ю-16 над пологом древостоя (на вышке). Измерения проводились с 7 до 19 ч при ясной погоде и в пасмурные дни (21 и 23 VII 1977) при сплошной равномерной облачности. Техника измерений была следующей. Датчик люксметра был помещен в черный тубус глубиной 10 см квадратного сечения со стороной 10 см; освещенность измерялась по 16 указанным направлениям и по 13 направлениям по ходу солнца. Плоскость датчика для каждого направления устанавливалась перпендикулярно оси измерения. Затем по каждому из направлений были сосчитаны средние арифметические значения освещенности из всех сроков наблюдений отдельно для ясной и пасмурной погоды. За единицу было принято наименьшее среднее арифметическое значение. Для всех остальных направлений поправочный коэффициент находился делением соответствующей средней на базовую (наименьшую) среднюю.

Чаще в исследованиях, по-видимому, могут представлять интерес интегральные поправочные коэффициенты, отражающие в какой-то степени суммарное количество радиации за определенный период, попадающей под полог древостоя из разных зон небесной сферы. Для этого следует учесть не только светимость разных зон небесной сферы, но и соотношение ясного, полужасного и пасмурного неба для данного района в среднем за несколько лет. Нами в основу расчетов интегральных коэффициентов по-

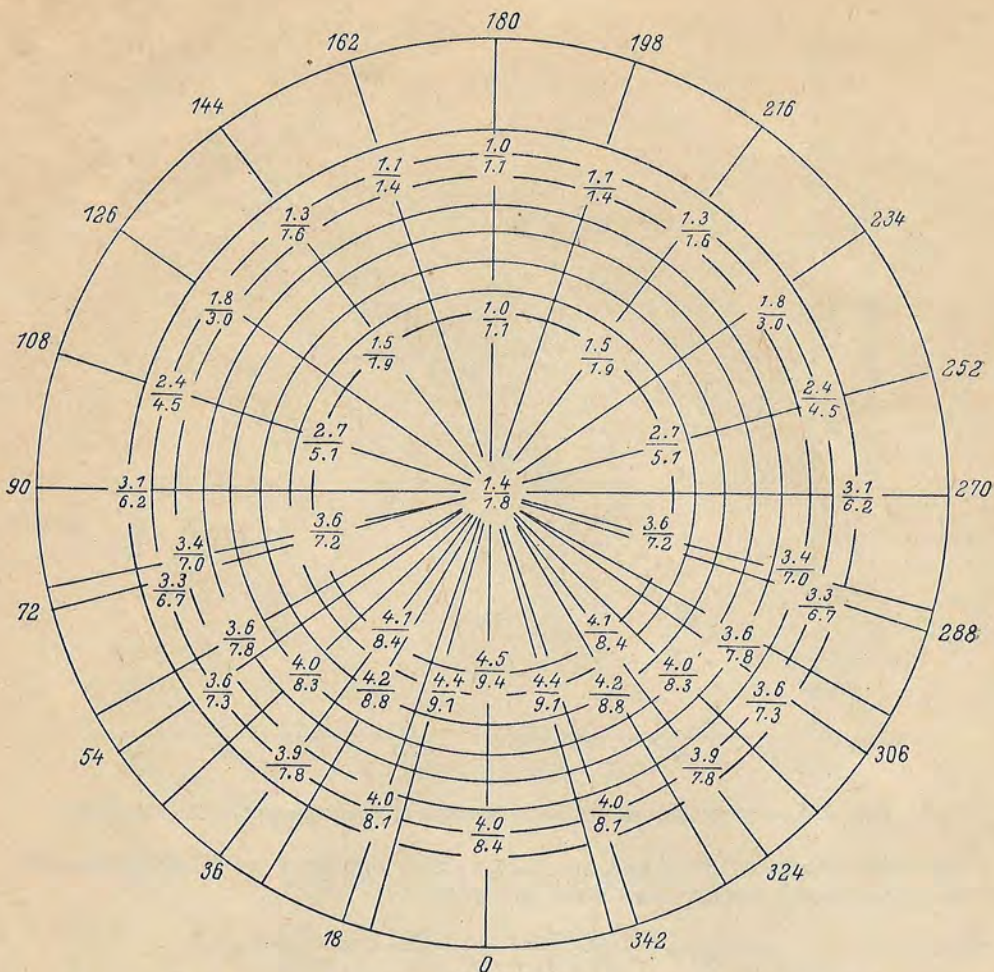


Рис. 4. Поправочные коэффициенты для расчета взвешенной сквозистости.

Верхняя цифра — интегральный коэффициент, нижняя — коэффициент для ясной погоды.

ложены упомянутые данные об освещенности, полученные на вышке, и сведения о соотношении повторяемости ясного, полужасного и пасмурного неба за июнь, июль и август для района исследования (Справочник по климату, 1968): ясных дней 30%, полужасных — 15% и пасмурных — 55%. Освещенность, получаемая из разных зон для полужасного неба, вычислялась нами как средняя арифметическая из освещенности ясного и пасмурного дней. Для каждого из 16 направлений, принятых при измерении сквозистости, определялась освещенность на вышке и находилась средняя взвешенная освещенность по формуле

$$L_{\text{взв}} = \frac{L_{\text{я}}n_{\text{я}} + L_{\text{п}}n_{\text{п}} + L_{\text{пж}}n_{\text{пж}}}{n_{\text{я}} + n_{\text{п}} + n_{\text{пж}}},$$

где $L_{\text{взв}}$ — средняя взвешенная освещенность для данного направления; $L_{\text{я}}$, $L_{\text{п}}$, $L_{\text{пж}}$ — средняя освещенность соответственно за ясный, пасмурный и полужасный день для данного направления; $n_{\text{я}}$, $n_{\text{п}}$, $n_{\text{пж}}$ — повторяемость (в процентах) ясных, пасмурных и полужасных дней. Наименьшая средняя взвешенная освещенность принимается за единицу, остальные коэффициенты по направлениям находятся делением соответствующих средних взвешенных на наименьшую. Поправочные коэффициенты для ясной погоды и интегральные даны на рис. 4.

Используя найденные поправочные коэффициенты, легко рассчитать среднюю взвешенную сквозистость для данного участка. Если исходная

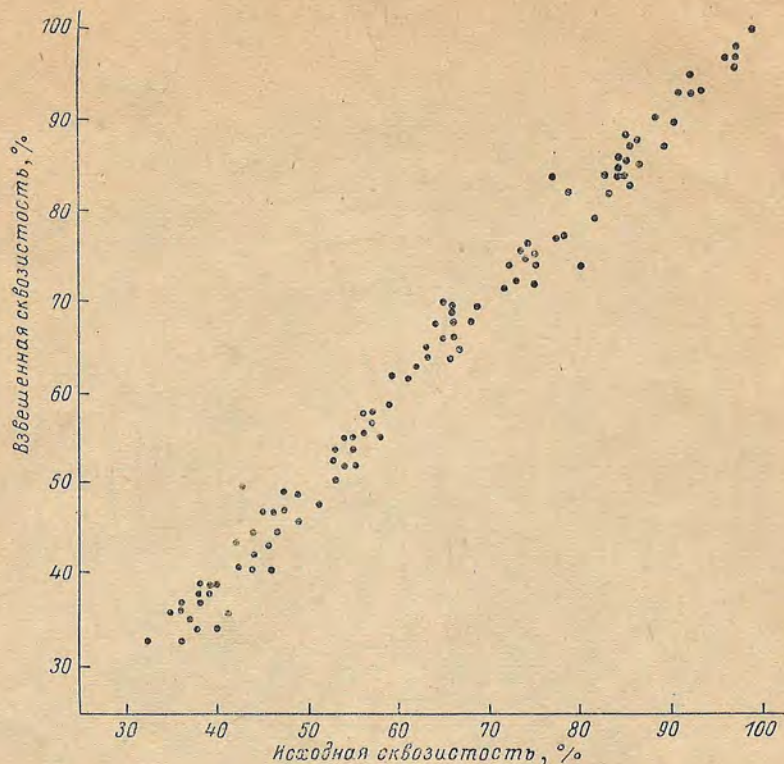


Рис. 5. Соотношение исходной и взвешенной (интегральной) сквозистости.

сквозистость находится как средняя арифметическая из 16 направлений, то взвешенная определяется по формуле

$$\bar{x}_{\text{взв}} = \frac{x_1 k_1 + x_2 k_2 + \dots + x_{16} k_{16}}{k_1 + k_2 + \dots + k_{16}} = \frac{\sum x_i k_i}{\sum k_i},$$

где $\bar{x}_{\text{взв}}$ — средняя взвешенная сквозистость, x_i — исходная сквозистость по каждому из 16 направлений, k_i — поправочные коэффициенты. В зависимости от того, какие коэффициенты используются для пересчета, могут быть получены средневзвешенная сквозистость для ясной и пасмурной погоды и интегральная. При исследованиях интерес представляют прежде всего взвешенные сквозистости для ясной погоды и интегральная.

Исходная и взвешенная сквозистости могут существенно различаться. Так, на двух участках при одной и той же исходной сквозистости, равной 50%, взвешенная интегральная оказалась в одном случае 66%, в другом — всего лишь 34%. Еще сильнее эти участки различаются взвешенной сквозистостью, если взяты коэффициенты для ясной погоды — соответственно 71 и 24%. Приведенные цифры получены при сравнении контрастных участков (северные и южные опушки леса). В лесу же со сравнительно равномерным древостоем, лишенным больших окон, взвешенная сквозистость может практически не отличаться от исходной (рис. 5). Дисперсионный анализ обнаружил очень тесную связь исходной и интегральной взвешенной ($\eta^2=0.91$) и несколько слабее ($\eta^2=0.86$) в случае взвешенной для ясной погоды. Однако и в лесу в отдельных случаях наблюдаются различия, так для ясной погоды в 12% случаев разница превысила 5% сквозистости, с чем нельзя не считаться.

Для выяснения возможности использования сквозистости в качестве показателя микроклиматических условий под пологом древостоя была проведена следующая работа. В 30-летнем зеленомошно-лишайниковом сосняке было выбрано 15 площадок по 1 м². Для каждой площадки измерена сквозистость по 16 направлениям и рассчитаны средние взвешенные

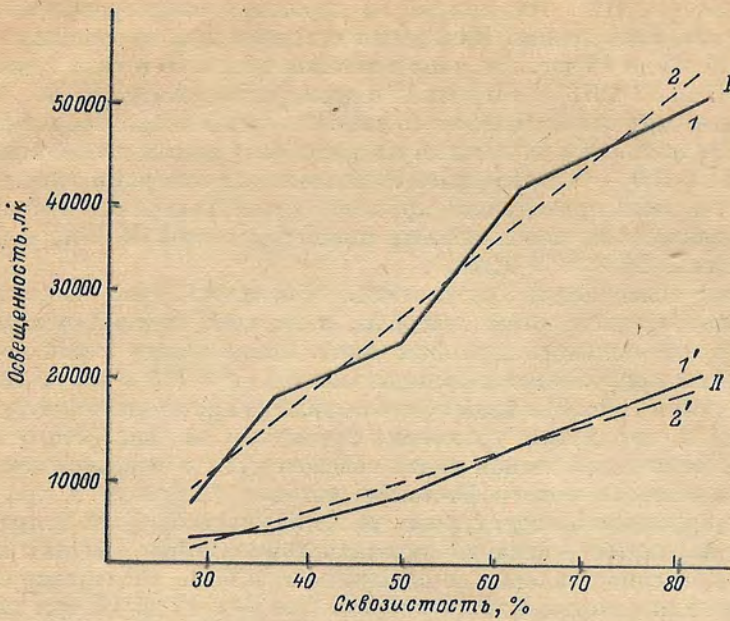


Рис. 6. Связь между сквозистостью древостоя и освещенностью под пологом древостоя.

Здесь и на рис. 7: I — ясная погода: сплошная линия — эмпирическая линия регрессии, штриховая — теоретическая линия регрессии ($y = -16\,620 + 850x$); II — пасмурная погода: сплошная — эмпирическая линия регрессии, штриховая — теоретическая линия регрессии ($y = -8760 + 347x$).

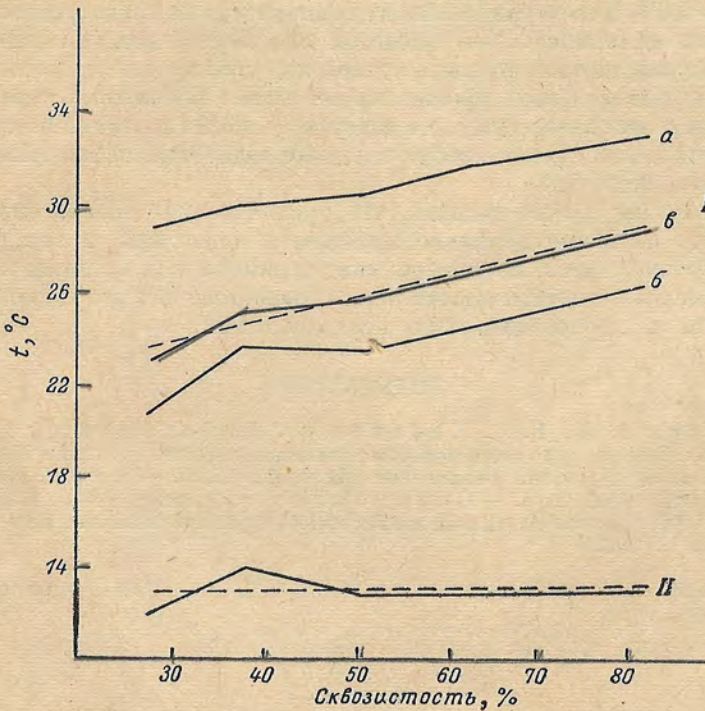


Рис. 7. Связь между сквозистостью и температурой под пологом древостоя.

I — ясная погода: сплошная линия — эмпирическая линия регрессии, штриховая — теоретическая линия регрессии ($y = 21 + 0.1x$), II — пасмурная погода: сплошная — эмпирическая линия регрессии ($y = 13 + 0.01x$), штриховая — теоретическая линия регрессии.
а — 13 VI 1977, б — 15 VI 1977, в — средние за весь срок.

сквозистости для ясной и пасмурной погоды, охвачен диапазон сквозистости от 27 до 85%. На каждой из площадок были проведены микроклиматические наблюдения. Измерения освещенности проводились люксметром Ю-16 с 8 до 18 час. два раза в течение часа в 10 точках в ясную погоду (12, 13, 14 VI 1978) и в 5 точках в пасмурную погоду (15, 16, 17 VII). В дальнейшем при сопоставлении со сквозистостью использована средняя освещенность площадки за каждый из дней, полученная из 200 измерений в ясный день и 100 — в пасмурный. Параллельно с замерами освещенности на тех же участках проводились круглосуточные измерения температуры воздуха и влажности; использованы термографы типа М-16Ас и М-16Ан и гигрографы М-21Ас и М-21Ан.

Получены следующие результаты. Оказалось, что сквозистость, определяемая предложенным способом, в высшей степени надежно характеризует освещенность в данном месте. Связь между этими показателями очень тесная, близкая к функциональной ($r^2=0.98$ в ясную погоду и 0.89 в пасмурную, рис. 6) и может быть выражена прямолинейной функцией вида $y=a+bx$, параметры уравнения приведены на рис. 6.² В литературе также отмечается тесная связь освещенности и сквозистости древостоев, определенной фотографическим методом (Акулова и др., 1964). Для характеристики температурных условий участков были испробованы различные варианты — средняя суточная температура, средняя дневная и другие. Для сопоставления со сквозистостью была рассчитана средняя температура для самого жаркого времени дня — с 12 до 16 час. характер связи показан на рис. 7, где даны кривые для отдельных дней и для средних за весь срок наблюдений в ясную и пасмурную погоду.

Видно, что температура также определяется сквозистостью, правда, размах различий зависит от общего температурного фона (ср. дни 13 и 15 VI). В целом же для ясной погоды связь прямолинейная и достаточно тесная ($r^2=0.68$). В пасмурную погоду температура на исследуемых участках практически одинакова. Что касается влажности воздуха на участках с разной сквозистостью, то здесь четкой картины не получилось. Она держится примерно на одном уровне, кроме самых затененных участков, где в ночные часы несколько суше, а в дневные — более влажная по сравнению со всеми остальными. Здесь требуются дополнительные наблюдения и более совершенная техника.

В заключение можно сказать, что предлагаемый способ определения сквозистости оказался довольно простым и надежным, а сам фактор — хорошо отражающим особенности микроклимата под пологом древостоя. Все это позволяет считать сквозистость древостоев весьма перспективным показателем в геоботанических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

- Акулова Е. А., В. С. Хазанов, Ю. Л. Цельникер, Д. М. Шиншов. (1964). Пропускание света пологом леса в зависимости от падающей радиации и сомкнутости крон деревьев. Физиология растений, 11, 5. — Алексеев В. А. (1975). Световой режим леса. — Справочник по климату СССР. (1968). — Matusz S. (1960). Metoda okrešlania a¿urowošci pulapu drzewostanu. Prace Inst. badawezego lešn., n. 202.

Ленинградский государственный университет.

Получено 16 I 1979.

² Поскольку характер связи между сквозистостью и освещенностью может несколько меняться в зависимости от лесобразующей породы и условий произрастания, следует осторожно пользоваться приведенными уравнениями.