

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259043901>

# Daylighting Aspects for Plant Growth in Interior Environments

Article in *Light and Engineering* · January 2009

---

CITATIONS

7

---

READS

2,494

1 author:



Mojtaba Navvab

University of Michigan

102 PUBLICATIONS 699 CITATIONS

SEE PROFILE

## DAYLIGHTING ASPECTS FOR PLANT GROWTH IN INTERIOR ENVIRONMENTS \*

Mojtaba Navvab

*University of Michigan*  
*Email: moji@umich.edu*

---

### ABSTRACTS

This study reports on the daylighting design for plants within interior spaces. Plants are as much a part of the architectural design of today's interior design as are lighting and furniture. Most daylight buildings are designed with permanent spaces for plants. The types of plants and the conditions of their placement in each space should be evaluated at an early stage of the design process. This paper describes the effects of lighting and daylighting design, particularly dynamics of daylight for its intensity and spectral characteristics impact on plants. The basic factors in plant lighting are discussed. The architectural design application of how glazing systems contribute to plant growth and could be integrated with the lighting system design is introduced.

**Keywords:** daylighting, plants, glazing systems, dalx

### 1. INTRODUCTION

Plants are as much a part of the architectural design of today's interior design as are lighting and furniture. Most buildings, especially those admitting daylight, are designed with permanent spaces for plants. The types of plants and the lighting conditions of each space should be evaluated at an early stage of the design process. There is a plant loss of 20 to 40 % each year for all interior landscape projects due to various factors such as the quality of the soil, water, drainage, planters, lighting systems and available daylight with its dynamics.

### 2. LIGHTING FOR PLANTS

Any daylighted building is impacted by the local climate. Given daylight as a light source for interior plants in buildings, the lighting designer has to provide the position of the source (aperture size and location) windows, skylights and their integration with the electrical lighting system. Since skylights are totally exposed to the sky, fully automated or manually operable shading devices are essential. Daylight is admitted primarily through the ceiling or the windows. Plants are mostly positioned on a vertical plane. This has created a new plane for calculation where the vertical illuminance should be at least equal to the horizontal illuminance. Most plants are placed vertically with the light source (daylight) striking them on top and front. These factors produce various lighting conditions which are desirable or undesirable depending on the lighting designers' objectives. The interior landscaping industry has grown tenfold in the last decade. There is not a building constructed today without some major effort given to interior landscaping. Factors to consider on lighting for interior landscaping are as follows: **1.** Solar and daylight availability; **2.** Distribution of Light; **3.** Glazing system; **4.** Light source; **5.** Temperature environment; **6.** Plant types.

#### 2.1. SOLAR AND DAYLIGHT AVAILABILITY

The solar spectral irradiance falling on Earth decreases as function of the atmospheric conditions. Air mass is determined by the slant path from the sun to Earth. The solar spectral irradiance is the distribu-

---

\* Report at the Balkanlight Conference 2008

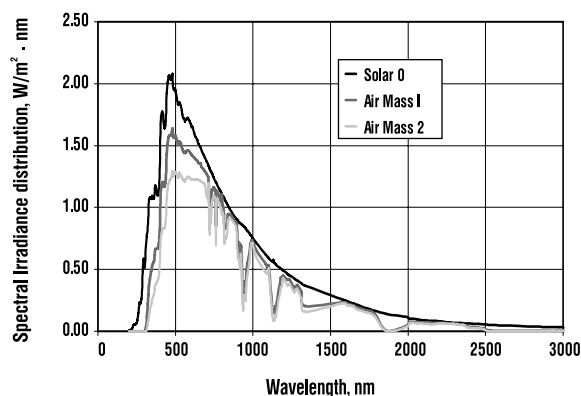


Fig. 1. Spectral Irradiance as a function of air mass

tion of the solar constant radiant power as a function of wavelength in the absence of the Earth's atmosphere. The solar constant of  $1367 \text{ W/m}^2$  has 96% of its solar spectral irradiance contained in the wavelength range from 270 to 2600 nm, while 49.6% lies in the 400 to 760 nm wave band. Fig. 1 shows the standard NASA/ASTM solar irradiance for air mass = 0 (outside the Earth's atmosphere), air mass 1, and air mass 2, with their spectral irradiance values on Earth. It is noticeable that half of the solar radiation is in the wavelength range that serves the human eye for vision and plants. Although today's climate and or stratospheric changes due to global warming may result in a very small increase in the total solar energy, nonetheless, a disproportionate increase in the UVR below 340 nm would increase the hazards of UVR. Such an increase would be very dangerous to animal and plant life including humans. Fig. 2 shows the total, direct sun and sky illuminance reaching earth as a function height, [1,3–6, 14].

## 2.2. DISTRIBUTION OF LIGHT

The use of skylights with a tinted or fritted glazing system in addition to an automatic shading and lighting system allows control of the distribution, intensity and duration of light; but it may not prevent the plants' exposure to ultraviolet and infrared wavelengths on either side of the visible spectrum. Bottom leaves drop when light enters from above the plant vertically and filters throughout the canopy, leaving little light to reaching lower leaves. If light strikes the plant from the side (horizontally), the plant will bend in the direction of the light. The shape of the tree is based on the sky or daylight distribution. Under these conditions, a quarter turn of small potted plants every 2<sup>nd</sup> or 3<sup>rd</sup> day usually maintains natural form. For tall plants supplemental interior lighting must be properly designed

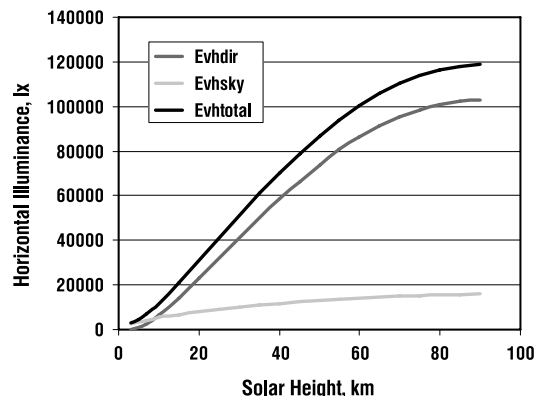


Fig. 2. Daylight availability as a function of height

for good light distribution. The following factors filter out valuable light: Tinted glass; Curtains; Building overhangs; Trees beyond window (especially evergreens). Where the daylight is not uniform due to the fenestration design, the electric lighting system and its distribution should do the job. The glazing system and specific coating should be carefully selected. Fig. 3. shows a typical cross section of the glass with three of the most often used atrium glazing systems and the daylight components and how the light reaches the indoor plants [15,16,17].

## 2.3. GLAZING SYSTEM

There are three possible options. 1) The first would be a three layer laminated glass product consisting of an inboard and outboard layer of 1.9 mm (0.075") thickness glass with a 0.030" thickness polyvinyl butyral inner layer. 2) The second would be a DuPont product – «Sentry Glass» – that has a 0.762 mm (0.030") polyvinyl butyral layer on one side only with a protective film layer and 3 mm (1/8") thick glass on the other side. 3) Third, two-layer glass not to exceed 12 mm (1/2") with PVB. Fig. 4 shows the spectral transmittance of these selected glazing. The UV transmittance needs for the animals and certain flowers is the key criteria for selecting the glazing system [16].

## 2.4. LIGHT SOURCES

Electrical lighting systems provide part or most of the plants' light level requirements indoors. The illuminance levels should be between 2500 and 7.500 lx, depending on the plant species used according to IESNA [2]. These light level requirement tables have not been upgraded during the last three revisions of the handbook. A wide frequency spectrum is desirable, (400 to 800 nm at least) to activate all the

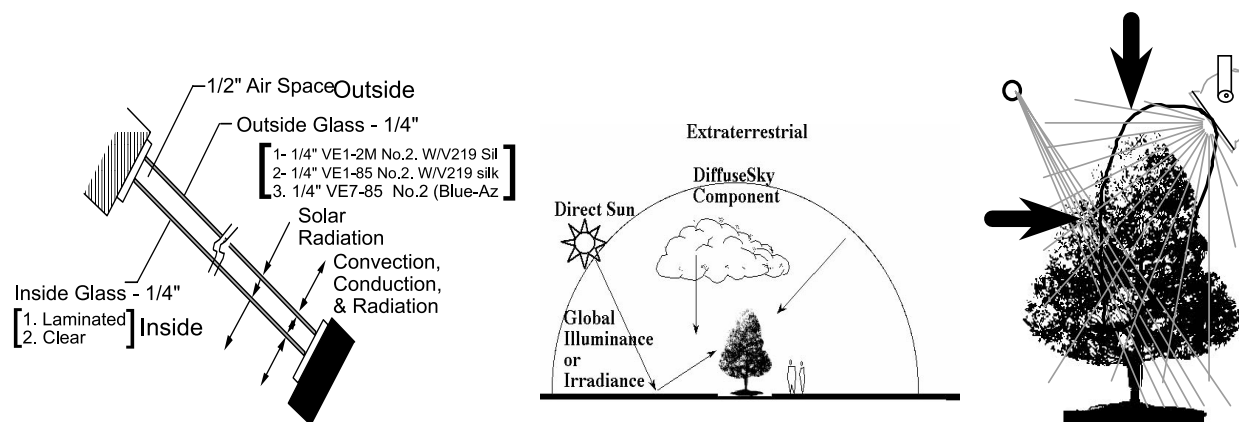


Fig. 3. Typical Atrium glass, daylight components and their direction falling on the indoor tree

plants' functions. Based on observation and measurements, there is no evidence that using special horticultural light sources in atria or interior space makes significant differences in growth of acclimatized plants. Also, given current lighting design practices, the benefits are too marginal and color rendering is not at its best. Color rendition can be a problem with some selected light sources. A limited spectral output may be selectively absorbed by leaves. Fluorescent lighting can be very well color-balanced, while mercury and sodium light are not easy to modify for color. Mercury lights tend towards the blue end of the spectrum and sodium emits either a single wavelength yellow or a broader, but still orange, color. Under Sun light leaves may appear gray or black. Despite this, of these latter types of sources, the high-intensity discharge lamps, are favored for atrium lighting because they are efficient in high spaces and their spectral characteristic can be altered with theatrical lighting filters to achieve the desired dark period for plants.

## 2.5. TEMPERATURE ENVIRONMENT

The ideal temperature environment is between (16 °C or 62 °F) to (22 °C or 72 °F) with a relative

humidity of at least 50%. Temperatures greater than (29 °C or 85 °F) coupled with low lighting result in lowering of plant vitality, and favors insect and disease reproduction. Temperatures less than (12 °C or 55 °F) may cause chilling effects and produce damage to tropical plants. The degree of hardiness among plant means some plants can withstand lower minimum winter temperatures (MWT) than others. Based on the average MWT concept, The Botanical Garden building in Ann Arbor is within Zone 5. For example a plant hardy in Michigan (zone 5) means it can survive a MWT of -29 °C to -23 °C (-20 °F to -10 °F). Fig. 5 shows the plant hardiness zones map based on average MWT. Table 1 shows specific zone limits within North America [8,15].

## 2.6. TYPES OF PLANTS

Classification of plants used in interior landscaping: **Tree:** grows as a single plant in container: min. size 1 to 2 m, max. size 5 m to 8 m.

*Examples:* Weeping Fig, India Laurel, Japanese Loquai. **Floor Plant:** grows 0.4 m to 1.5 m tall. They are used separately or in groups. *Examples:* Norfolk Island Pine, Lady Palm, Green Pleomele. **Pot Plant:**

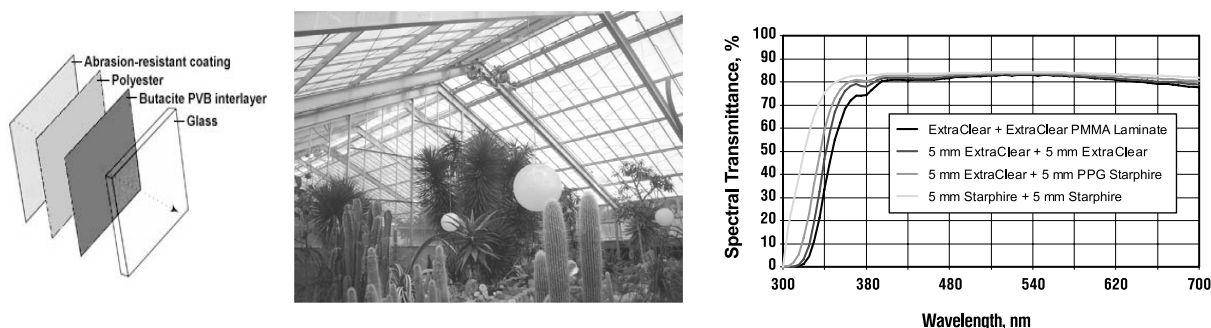


Fig. 4. The laminated glass; UM-Botanical Garden; and Spectral Transmittance of Selected Glazing Systems

**Table 1. Plant hardiness zones and the minimum winter temperatures (MWT)**

zone 1	Below	–	– 50F/–46C
zone 2	– 50F/–46C	to	–40F/–40C
zone3	– 40F/–40C	to	–30F/–34C
zone 4	– 30F/–34C	to	–20F/–29C
zone 5	– 20F/–29C	to	–10F/–23C
zone 6	– 10F/–23C	to	00F/–18C
zone 7	00F/–18C	to	+10F/–12C
zone 8	+ 10F/–12C	to	+20F/–7C
zone 9	+ 20F/–7C	to	+30F/–1C
zone10	+ 30F/–1C	to	+40F/+4C

wide range of plants that grow in different size pots up to 0.20 m. *Examples:* Asparagus Fern, Grape Ivy, Japanese Laurel

### 3. PHOTO RESPONSE IN PLANTS

Plants with their unique biology convert radiant energy into food. This process requires architects and interior landscape designers to pay attention to plant lighting needs. There are two general lighting system applications for horticultural needs: photosynthetic and photoperiods. Green plants take carbon dioxide from the air, water and inorganic nutrients from the soil in the presence of light energy from sunlight or electric light sources to produce carbohydrates. Foliage and light energy are both a potential sources of energy and loss of energy for the plants. Gain comes from photosynthesis, development of carbohydrates. Loss comes from respiration, using energy both in light and dark periods.

#### 3.1. PHOTOSYNTHESIS

Photosynthesis is associated with green house lighting applications. The seasonal variations have limiting factors and the lighting levels shortcomings have to be satisfied by supplemental lighting as needed for a given site location and the architectural design of the facility. There is a growing industry beyond the environmental chambers or greenhouse design and their current use in horticultural research for crop growth studies which includes large scale commercial building, and is not limited to construction of conservato-



Fig. 5. North America, plant hardiness zones map based on average MWT

ries within hotels, resorts, retail stores and major shopping centers. The lighting systems designed for these applications rely heavily on control of the photoperiod since the use of these buildings given human occupancy schedules requires mixed use of electrical lighting sources with different spectral distributions. The use of controls along with light filters provides the specific band of spectrum and the plant exposure time from light to dark for flowering, and the simulation of the natural photosynthetic cycle needed for specific plants.

Solar radiation does impact all phases of plant growth. Photosynthesis is the key phase. While plants use the light along with water and carbon dioxide to form carbohydrates, oxygen is released as a byproduct. Some amount of oxygen is used during this process due to respirations. Although the respiration continues during the dark period, the photosynthesis stops. The green pigments or green coloring by chlorophyll is a major index for the action spectra during the photosynthetic carbon fixation. Studies show the peak for both processes occurs around 435 to 445 nm in blue and 650 to 675 nm in red, and if plants are left in dark for few days, the chlorophylls decomposes, and the yellowing of the leaves signals the plants' destruction. Higher plants have three times more need of light than lower plants due to the differences in their chlorophylls [8,17].

The photo response is initiated by phytochrome reactions which govern the growth response in plants. The phytochrome molecule is a blue color protein acting as an enzyme in two reversal forms. One known as Pr or P660, and the second form called Pfr or P735 by the radiation that is absorbed.

However, the second form can no longer absorb the red region of the radiation. This is due to restoration needs of phytochrome to Pr or P660 which occurs during the dark period at a slower rate. The rate depends on the temperature and humidity. See Fig. 6.

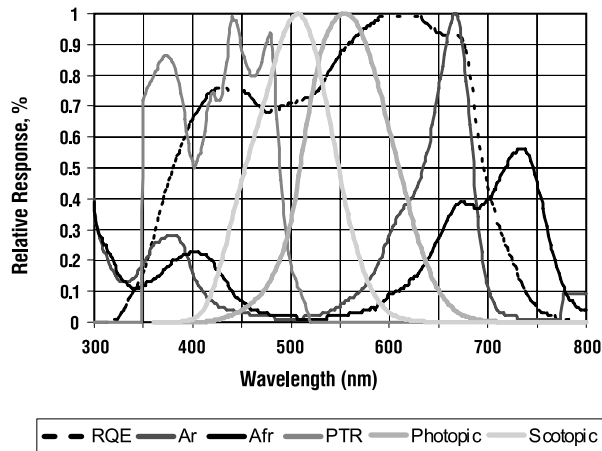


Fig. 6. Plant and human eye spectral sensitivity functions.

**Table 2. Plants minimum light requirements**

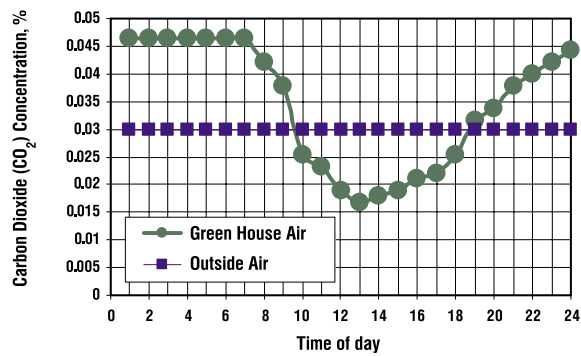
PLANT MATERIAL	LIGHTING REQUIREMENTS (dalux or fc)
Bambusa Old Hamii	200–250
Cycas Circilalis	150–250
Cyalhea Species (Australian Tree Fern)	200–250
Caryota Species	100–250
Ficus Lyrata	100–250
Ficus Species	150–250
Howea Foresteriana	100–250
Licuala Species	150–250
Moms Alba "Pendula"	250+
PandanusTectorius	150–250
Pandanus Utilis	150–250
Philodendron Selloum	75–250
Philodendron Species	75–250
Phoenix Roebelinii (Pygmy Date Palm)	150–250
Podocarpus Macrophyllus	150–250
Ptycosperma Macarthurii	150–250
Rhapis Species	100–250
Salix Babylonica	250+
Strelitzia Nicolai	150–250
Vetchia Merrilli	150–250

Fig. 6 shows the spectral sensitivity functions on relative quantum efficiency (RQE); Phytochrome red absorbing state (Ar), phytochrome far red absorbing state (Afr); and photopic and scotopic sensitivity functions for human eye. Table 2 shows lighting requirements for some of these selected plants [2, 8].

Daylight can be more beneficial to plants than electric light sources. In most cases, with the application of current information available on how to increase light duration, daylight could be used for lighting interior plants. One of the major advantages in the application of daylight for plants is its full spectrum and dynamic light qualities. The plants adapt to most extreme lighting conditions, however a quite noticeable problem arises from the use of mixed light sources for the illumination of plants. This causes color rendering distortions which become more obvious when light sources of different color temperature are aimed directly onto the plants' area. As a plant emerges from the seed, its photoreceptors are present. Plants with formed germination start the photosynthesis. The following sections describe the effects of these factors and their impact on designs providing daylight for plants.

### 3.2. PHOTOPERIODS AND THE REQUIRED RADIANT ENERGY

Light is one of the major maintenance factors in landscape lighting. It supplies energy to plants which affects the key photo responses that converts light energy into chemical energy. These reactions produce the conditions that provide the maintenance requirements for plants. There is a correlation between the light and dark period which affects all plants. Studies show the length of darkness impacts plants more than the light period. Red light with its peak at 660 nm is the major variable influencing the photoperiod response. Light destroys the florigen substance that is necessary for induction of flowering. The critical concentration of florigen that is needed for short day plants requires long dark period exposure. The Proper light requirements for interior plants or the best photo period is 12 to 16 hours of daylight and electric light. Preferably 8–12 hours of darkness every 24 hours provides proper chlorophyll development and function, and produces normal plant response. Based on studies by Tazawa, Hirota and Rogers, et al. [9–14], the following environmental parameters and consideration for plant growth with respect to Photo Period Density (PPD), Photosynthetic Active Radiation (PAR) and

Fig. 7. CO<sub>2</sub> concentration vs. time [17]

Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) are recommended (100 lx from cool white fluorescent lamp is approximately equal to  $1.3 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ):

1. A minimum PPD of six hours is required; however a PPD of 8–12 hours is more ideal.
2. A minimum PPD of six hours requires a minimum of  $694 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  ( $152 \text{ W}/\text{m}^2$ ) to obtain 15 mol PAR/day or a minimum level of  $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  ( $219 \text{ W}/\text{m}^2$ ).
3. Plants with low shade factors have a PPFD minimum requirement of  $230 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  ( $50 \text{ W}/\text{m}^2$ ) for 12 hours to obtain 10 mol PAR/day.
4. Plants with high shade factors have a PPFD minimum requirement of  $350 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  ( $77 \text{ W}/\text{m}^2$ ) for 12 hours to obtain 15 mol PAR/day. Plants with low shade factors require less daylight.

### 3.3. CARBON DIOXIDE

Experimental studies show that the carbon dioxide enrichment of the green house atmospheres contributes to the growth of plants. Typical outdoor air contains 250 to 300 ppm (part per million) carbon dioxide by volume. The greenhouse has less when is absorbing the light. Crop growth drops when carbon dioxide is less than 200, and stops at 125 ppm. Fig. 7 shows the carbon dioxide concentration in a greenhouse while the vents are close during the winter season. As the daylight enters the space the CO<sub>2</sub> drops due to the photosynthesis process, and it peaks again as the daylight period ends. The CO<sub>2</sub> is too low during the daytime as compare to outside during winter season conditions. The results of the same studies show the photosynthesis rate increases as a function of CO<sub>2</sub> concentration. Levels of 1000 to 1400 ppm should be maintained for best outcomes and utilization of daylight and electric light. Fig. 8 shows the relative light intensity as a function of the rate of photosynthesis [2, 8, 17].

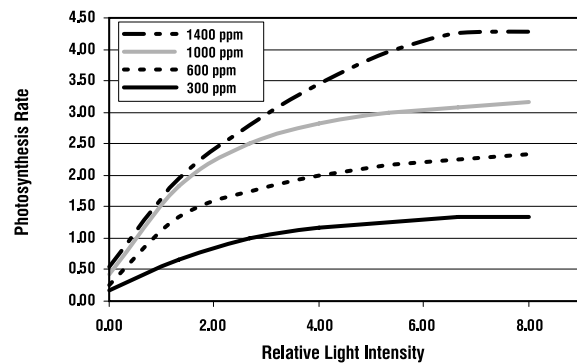


Fig. 8. Light intensity and Photosynthesis Rate [17]

## 4. LIGHT INTENSITY

There are three major effects which must be considered by daylighting designers and utilized at the beginning of the design process. The factors are: 1) The amount of light and its intensity; 2) The duration of the exposure; and 3) The spectral characteristics of the daylight. Light intensity levels and sufficient light levels are important to produce energy reserve in the plant in excess of its respiration needs. Otherwise respiration will use all of the energy collected in photosynthesis, and plants will deteriorate and die. It is obvious that the radiant energy for plants and that for human vision overlap given the spectral characteristic of the natural and electrical light sources used in buildings. The sensitivity functions of the human eye (photopic and scotopic) and plants' photosynthesis processes are shown in Fig. 6. The use of illuminance (lx) or irradiance ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) allows one to quantify the illuminance or irradiance falling on the surface of plants. The latest luminance scanning system allows one to quantify these levels in more details. Figs. 9 and 10 show the actual image of an indoor tropical plant and the luminance ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) levels of all plant surfaces. Most plants identified in the current literature [2] require illuminance in range of 2500 to 7500 lx given the control system provided by the lighting system in order to maintain a photoperiod of 14 hours. The use of daylight and architectural elements allow not only the reduction of these intensities, but also the durations.

The specific movement of a plant's parts is due to illumination. It is called phototropism. The term, positive tropism, is used to indicate that the plant bends toward the light source, while negative tropism indicates that the growth is away from the light source. Sunflower heads turn toward the east in the morning, and toward the west in the evening, following the course of the sun. Phototropic responses are not equal



Fig. 9. Full view of an indoor tropical plant



Fig. 10. Daylight reaching the tropical plant

in all parts of the visible spectrum. Some researchers have found that the most effective wavelengths ranged from 400 to 480 nm, which are the violet and blue regions of the spectrum, see Fig. 6. No phototropic effect is produced by the red end of the spectrum. For this reason, quantitative determinations of auxins (natural hormones) are made in the red light. In the green region, the phototropic effect is very slight. Phototropism may be manifested under very low intensities. It should be recalled that the photochemical effect of light on plants equals the product of time and intensity. The direction of light from a skylight is more desirable for plants with regard to the photomorphogenesis effect which makes plants grow towards light, and top lighting design preserves a natural shape. Some vertical light helps to give a balanced shape, but if the space is predominantly vertically lit, it may be necessary to position electrical light sources to provide compensating illumination. Another strategy is to rotate plants to give growth signals to all sides. The candlepower distribution of the lighting system is also important for the light distribution inside the space.

#### 4.1. PLANTS ACCLIMATIZATION

The typical lighting intensity in an interior space is between 50 and 200 dalx or fc. Some times illuminance levels are reported in «deka lx» or 10 lx (10.766 lx=fc), which is approximately equivalent to a 99%-98% shade level. **Note:** Shade level is the term used by shade cloth producers and the interior landscape designers to indicate the percentage of the sun light reduction. Commercial shade cloth is available in the many patterns of wave density for acclimatization of plants. The 47% shade admits 53% of the sun beam. To acclimatize plant material at the actual installation site is no different than acclimatizing the same plant under an extremely high shade level.

Both approaches will result in extensive foliage loss to typical leaf-dropping in varieties of plants such as *Ficus benjamina* and *Brassaia actinophylla* and this method will cause the plants to deplete their food reserves in order to reestablish this lost foliage. If the conditions are maintained in the same low-light environment, these plants will never be able to regain their depleted food reserves and reestablish the added protection that these reserves represent. It is highly recommended that plant material not be acclimatized at the actual installation site unless additional lighting is provided during the adaptation period.

#### 4.2. REQUIRED ILLUMINANCE

Illuminance, or the amount of light, is the strongest determinant of success for indoor planting. Sufficient light to promote growth must reach not only the trees, but also the ground-cover planting below them. The energy needs of most suitable plants are equivalent to at least the supply of 70 to 100 dalx or fc for 12 hours per day, with 250 to 750 dalx over a similar period, as the absolute minimum for survival. In daylighting terms, a daylight factor of 10 to 20% will be needed under the 1500 dalx or fc standard sky light only (no sun – dark winter days). Since this supply may not be available all year, supplementary sources must also be provided. These sources should preferably be off at night, keeping the daily rhythm normal. The way daylight is brought in to indoor space will affect its level and the growth pattern of plants. Higher sky luminance exists at the zenith of the sky than near the horizon, therefore skylights will deliver two or three times as much light per unit area as vertical glazing.

Light levels for maintaining interior plants are classified in three groups:

1. Low (100 to 150 dalx) *Philodendron*, *Golden Aglaonema*, *Corn Plant*



2. Medium (150 to 250 dalx) Asparagus Fern, Green Dracaena, Rubber Plant

3. High (250 to 350 dalx or fc.) Norfolk Island Pine, Fan Palm, Podocarous

#### 4.3. METHODS OF CALCULATION AND APPLICATION

During the winter the daylight is approximately one third of the summer daylight. The position of the sun is lower in the sky. Cloudy weather is more frequent, and hours of daylight are fewer. Extending the day length with electric light sources is essential to overcome the deficiencies of winter light. Total light requirements for interior plants: total light per day is the product of the intensity of light times its duration. Total light per day = dalx or fc times hours of daylight/day. Example:  $200 \text{ dalx} \times 12 \text{ hrs.} = 2400 \text{ dalx or fc/day}$ .

The major problem is that it takes leaf-dropping plants a much longer time to reinstate lost foliage utilizing the existing site lighting conditions, than if acclimatized under more optimum lighting levels (+ 50% shade level). Also, the temperature and relative humidity of the installation site are not as conducive as nursery conditions for fostering plant growth. These on-site installation conditions result in an appearance factor problem for an undetermined period of time that is preventable by acclimatizing the plant material under nursery conditions. At the nursery, better growth conditions usually prevail, and new re-growth can be more easily stimulated. It should be remembered that once a plant has been acclimatized for lower light conditions, this condition is not easily reversed. The chlorophyllous structure has by acclimatization been placed in a highly susceptible, though very functional, state. To subject this exposed structure to high light intensities can be very dangerous to the plant.

In fact, it has been shown through research that even intensities of only 2000 to 3000 dalx or fc can kill exposed chlorophyll. Plants can actually sunburn when placed outside in the sun, or top-burn when placed too close to a lighting fixture of high intensity. This is a possibility that in some cases needs to be watched for as closely as too little light, especially when one is specifying mounting heights of lighting fixtures over plant material. Some acclimatized plants can be converted back to full-sun plants. This must, however, be done in steps of several hundred to a thousand foot-candles at a time, and the process could take up to six months. Use of filters might be helpful in this process.

The sunrise to sunset time table could be used as lighting system schedules for the blackout/night time using filters and lighting control strategy to maintain the required illumination levels for the trees for selected positions at all hours of the day throughout the year. The fact that measurements of visible and total radiation from the sky and sun (real or simulated) are typically made with instruments that integrate radiation at various wavelengths presents some difficulties. Most lighting books show plant lighting level criteria in lx or fc. As discussed above plants are especially affected by light at wavelengths below 550 nm (although the atrium or retail spaces with skylight or window glazing are specified to exclude wavelengths below 400 nm). Color-corrected photocells are weighted to be substantially less sensitive to wavelengths near 400 nm than to those near 550 nm. The use of irradiance meter would provide better accuracy in quantifying the amount of radiation reaching the plant from lamps of different spectral energy distribution and the estimation of the efficacy of the mixed lighting systems.

#### 5. FINAL REMARKS

The following are the key factors regarding the quality of interior landscaping for plants:

1. Acclimated Plants;
2. Freedom from Diseases and Insects;
3. Freedom from Shipping Damage;
4. Freedom from Spray and Water Residue.

These steps are needed in order to demonstrate how integration of daylighting and electric lighting contributes to plant growth, and to bring interior landscape design to a successful stage:

1. Team Consultation (Architect, Interior Landscape, Designer and photo biologist);
2. Plant Selection (According to Light Levels, and Cultural Conditions);
3. Acclimatization (Adapting Plants to Interior Environment)
4. Installation (Coordinate the Installation);
5. Horticultural Services (Qualified Horticulturist to take care of cultural needs).

The major development in new lighting systems will have a major impact on plant response, and this growing industry has created a new market in plant production within the commercial building sector. The increased amount of basic research in this field of design is contributing to new areas of daylighting application and applied research as relates to plant growth.

## REFERENCES

1. Pitts Donald G., et al., Environmental Vision, Bullerworth Heinmann, ISBN0750690518.
2. Illuminating Engineering Society of North America, IESNA Handbook 1994, New York, New York, 2001.
3. Navvab, M., M. Karayel, E. Ne'eman and S. Selkowitz, Luminous Efficacy of Daylight National Lighting Conference Proceedings (CIBSE) 1988, pp. 409–420.
4. Navvab, M.; Karayel, M.; Ne'eman, E., and Selkowitz, S. 1984 a. «Daylight Availability Data for San Francisco.» Energy and Buildings, Vol. 6, pp.273–281.
5. Karayel, M.; Navvab, M.; Ne'eman, E., and Selkowitz, S. 1984. «Zenith Luminance for Daylighting Calculations.» Energy and Buildings, Vol. 6, pp. 283–291.
6. Navvab, M.; Karayel, M.; Ne'eman E., and Selkowitz, S. 1984 b. «Analysis of Atmospheric Turbidity for Daylight Calculation.» Energy and Buildings, Vol. 6, pp. 293.
7. Navvab, M., Prayhoonang, C. «Application of the New Standards for the Evaluation of Daylight and Solar Availability Measurements», Journal of the Illuminating Engineering Society (August 1995), pp. 113–130.
8. Bickford, Elwood D., and Dunn Stuart, Lighting for Plants Growth. The Kent State University Press, 1973, ISBN 0–87338–116–5.
9. Thimijan, R.W. and R.D. Heins.1983. Photometric radiometric and quantum light units of measure: A review of procedures for introversion. Hort Science 18 (6), pp. 818–822.
10. Hidenori Hirota and Katsuyuki Shiozawa: «Influence of Shading on the Initial Growth of Turf (in Japanese)», Turf Studies, Vol. 1305, No. 1, 1984.
11. Shinji Tazawa: «Application of Artificial Luminous Source to Growing Plants (in Japanese)», Journal of The Illuminating Engineering Institute of Japan, April 1996.
12. Rogers N. John, «Methods for growing turf grass indoors under reduced light conditions» The United State Patent By Rogers, III et al., Patent Number 5,617,671.
13. Rogers N. John, Et Al. «The Sport Tutf Management and Research Program at Michigan State University» Safty in American Football, ASTM, STP, Earl Hoemer, Ed., ASTM, 1996, pp. 132–144.
14. Sliney DH, Marshall WJ, Carothers ML, Kaste RC. «Hazard Analysis of Broad-band Optics Sources». Aberdeen Proving Ground, MD. US Army Environmental Hygiene Agency, 1980.
15. Bush-Brown, L. American garden Book, Macmillan Inc.N.Y.,1996. ISBN0–02–860995–6.
16. Navvab, M., et al., «Solar and daylighting and airflow performance of botanical garden», ASES, 2005.
17. Mpelkas, Christos,» Horticultural Light Sources, Sylvania Engineering Bulletin O-352, 05/1981.

**ACKNOWLEDGMENTS:** This project is funded by the Sustainable Design Research Laboratory at UM-TCAUP. Special thanks to Mike Hommel for his effort providing access to the UM-Botanical Garden.



**Mojtaba Navvab,**

Ph.D., a fellow member of the IESNA, a recipient of five IESNA's International Illumination Design Awards (IIDA) and the latter with several awards for daylighting research and for design input on some of the most prestigious architectural commissions of the 20 th century, a recipient of American Institute of Architecture (AIA) distinguished teaching award, chair of the Certificate Program in Simulation and Gaming Studies within Rackham School of Graduate Studies, member of International Advisory Board for the Lighting Research and Technology Journal

## Daylighting Aspects for Plant Growth in Interior Environments

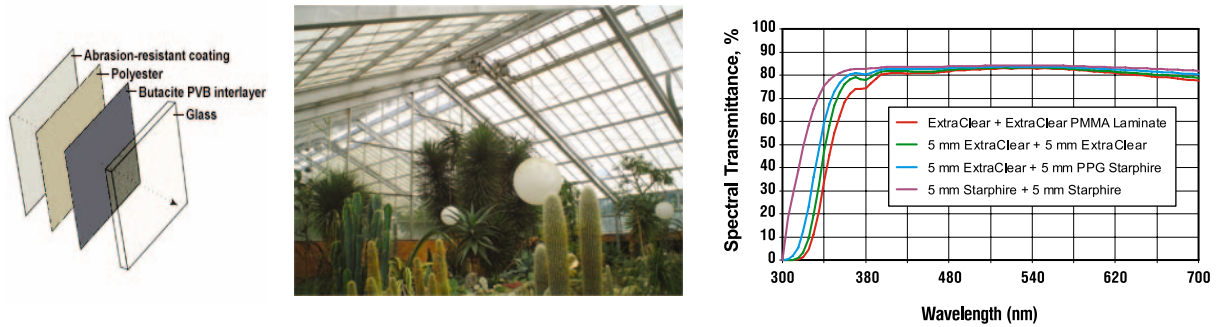


Fig. 4. The laminated glass; UM-Botanical Garden; and Spectral Transmittance of Selected Glazing Systems

**Table 1. Plant hardiness zones and the minimum winter temperatures (MWT)**

zone 1	Below	–	– 50F/–46C
zone 2	– 50F/–46C	to	–40F/–40C
zone3	– 40F/–40C	to	–30F/–34C
zone 4	– 30F/–34C	to	–20F/–29C
zone 5	– 20F/–29C	to	–10F/–23C
zone 6	– 10F/–23C	to	00F/–18C
zone 7	00F/–18C	to	+10F/–12C
zone 8	+ 10F/–12C	to	+20F/–7C
zone 9	+ 20F/–7C	to	+30F/–1C
zone10	+ 30F/–1C	to	+40F/+4C

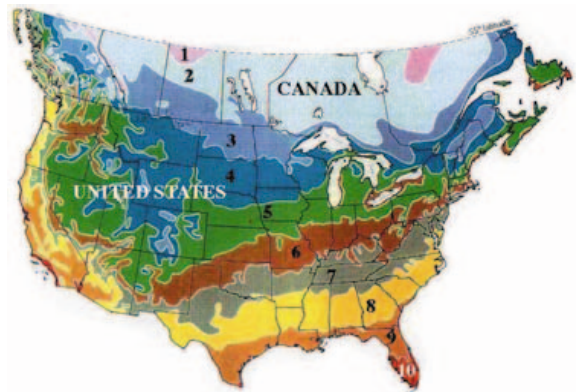


Fig. 5. North America, plant hardiness zones map based on average MWT



Fig. 9. Full view of an indoor tropical plant

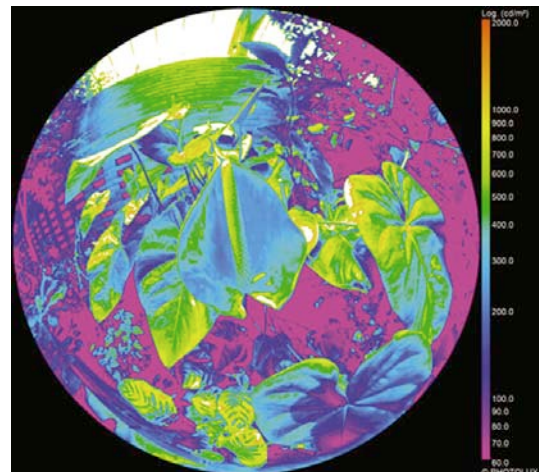


Fig. 10. Daylight reaching the tropical plant



# СВЕТО 3·2009

# ТЕХНИКА





# Аспекты естественного освещения интерьерных растений

М. НАВБАБ<sup>1</sup>

Мичиганский университет, Энн-Арбор, Мичиган, США

## Аннотация

Рассматриваются вопросы проектирования естественного освещения комнатных растений.

Растения, как освещение и мебель, – объекты современного дизайна интерьеров. Проектирование большинства зданий, особенно, с естественным освещением, предусматривает наличие постоянных зон для интерьерных растений. Необходимо уже в начале проектирования согласовывать между собой виды этих растений и условия их содержания.

В статье говорится о влиянии характеристик искусственного и естественного освещения на растения, в том числе динамики уровня и спектрального состава естественного освещения. Рассматриваются основные особенности освещения и вопросы архитектурного проектирования в части остекления, которое влияет на жизнедеятельность интерьерных растений и могло бы должным образом

учитываться в проектировании освещения последних.

**Ключевые слова:** естественное освещение, растения, остекление, декалюкс (длк)<sup>2</sup>.

## 1. Введение

Растения, как и освещение и мебель, – объекты современного дизайна интерьеров. Проектирование большинства зданий, особенно, с естественным освещением, предусматривает наличие постоянных зон для растений. Необходимо уже в начале проектирования согласовывать между собой виды этих растений и условия их содержания. От 20 до 40 % интерьерных растений каждый год гибнет в связи с такими факторами как почва, вода, дренаж, рабочие-сажальщики, системы освещения и имеющееся естественное освещение с его динамикой.

## 2. Освещение растений

Уровень энергетической освещённости на земле от солнца зависит от воздушной массы атмосферы. Считая

естественный свет источником естественного света для растений в интерьере, проектировщик освещения должен обеспечить требуемые характеристики этих источников света (ИС) – оконных проёмов и фонарей верхнего света – и их совмещение с системой электрического освещения. Поскольку вход фонарей верхнего света полностью обращён к небу, важно иметь полностью автоматизированные или управляемых вручную устройства затенения. Естественный свет в основном поступает от фонарей верхнего света, сверху, или из окон. Растения в основном располагаются вертикально, и потому вертикальная освещённость должна быть не меньше горизонтальной, причём источники естественного света освещают их сверху и сбоку. Это создаёт разные условия освещения – желательные или нежелательные, в зависимости от целей проектировщиков освещения. За последние 10 лет индустрия внутреннего озеленения выросла на порядок. В настоящее время не строится ни одного здания без проекта интерьерного озеленения. В освещении интерьерных растений должны учитываться следующие факторы: доступность прямого солнечного и естественного света; его пространственное распределение; конструкция остекления; ИС; температурная среда и виды растений.

### 2.1. О прямом солнечном и естественном свете

Поток солнечного излучения, падающего на землю, уменьшается в зави-

<sup>1</sup> По материалам доклада на 4-й Балканской светотехнической конференции Balkan Light, 7–9 октября 2008 г., Любляна.  
E-mail: moji@umich.edu  
Перевод с англ. Е.Т. Алиева.

<sup>2</sup> 1 декалюкс = 10 лк, что приблизительно равно 1 фут-свече.

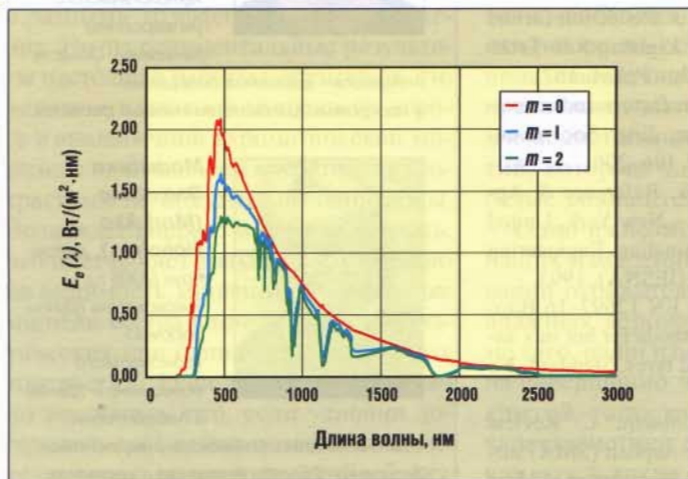


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности энергетической освещённости от солнца на поверхности земли  $E_e(\lambda)$  от воздушной массы  $m$

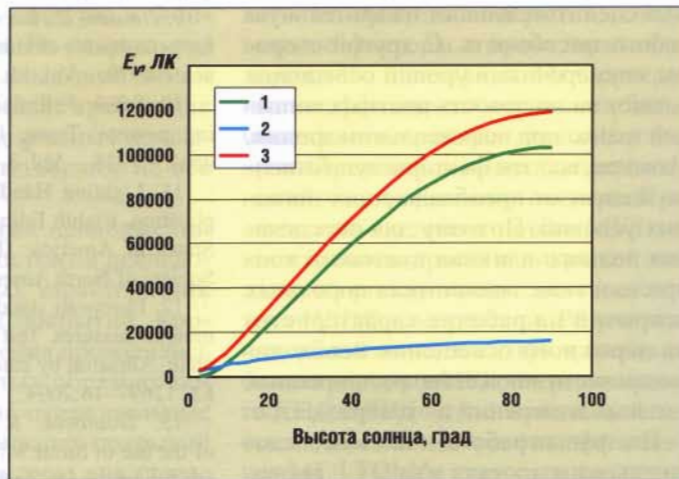


Рис. 2. Пример значений горизонтальной освещённости на земле ( $E_h$ ) от открытого солнца (1), неба (2) и общей (3) в зависимости от высоты солнца



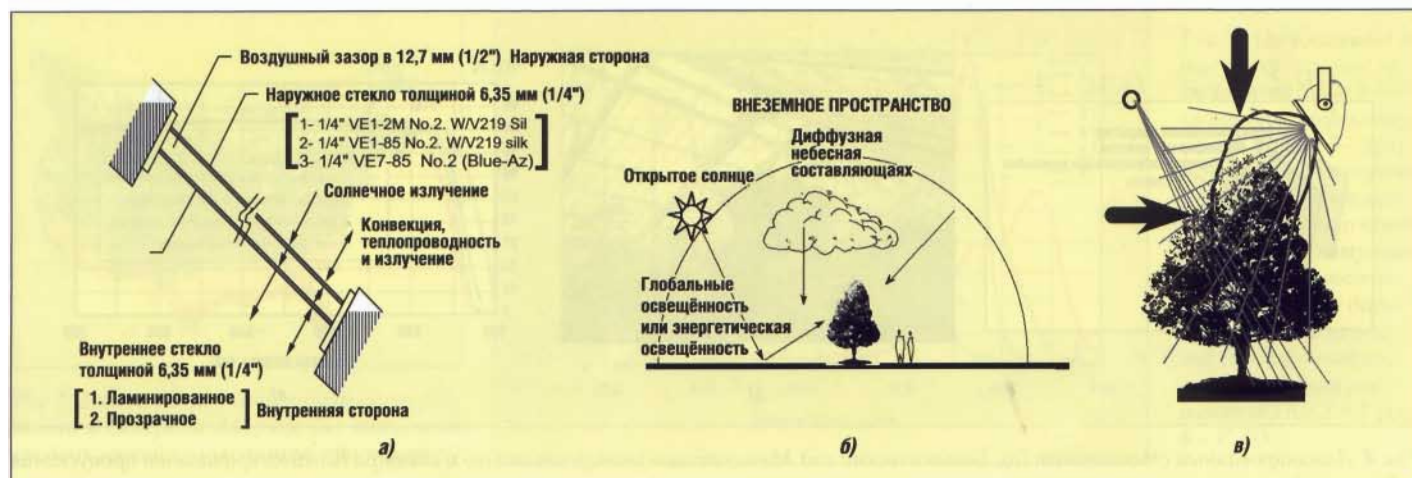


Рис. 3. Типичное остекление для атриумов (а), составляющие естественной освещенности (б) и направления падения света на дерево в интерьере (в)

симости от состояния атмосферы, её воздушной массы  $m^3$ . 96% солнечной постоянной, равной  $1367 \text{ Вт/м}^2$ , приходится на интервал длин волн 270–2600 нм, а 49,6% – на интервал 400–760 нм. На рис. 1 приведены стандартные спектры солнечного излучения (НАСА/Американское общество по испытанию материалов) при  $m=0$  (за земной атмосферой), 1 и 2, приведённые к поверхности земли. Видно, что половина солнечного излучения приходится на спектральный интервал, используемый для зрения, человека и для растений. Хотя современные изменения климата и стратосферы (из-за глобального потепления) могут вызвать, вероятно, лишь небольшое увеличение общей солнечной энергии, приходящей на землю, непропорциональное увеличение доли излучения в интервале длин волн короче 340 нм повысило бы опасность УФ излучения солнца. Это было бы очень опасно для животных, растений и человека. На рис. 2 приведён пример зависимостей от высоты солнца горизонтальных освещённостей на земле от открытого солнца, неба и от них обоих (согласно [1–6]).

## 2.2. Пространственное распределение света

Использование фонарей верхнего света с окрашенными или фриттованными системами остекления в сочета-

нии с автоматической системой затенения и освещения позволяет управлять распределением, интенсивностью и длительностью естественного освещения, но не может предотвратить воздействия на растения УФ и ИК излучений. При падении света сверху вниз он поглощается кроной, мало доходя до нижних листьев, что приводит к их опадению. При падении света сбоку (горизонтально) растения тянутся к его источнику. Форма дерева зависит от пространственного распределения естественного света. При этом необходимо обычно каждый второй-третий день поворачивать горшочные растения на  $90^\circ$  для поддержания их естественной формы. Для создания нужного распределения света в случае высоких растений необходимо грамотно спроектированное дополнительное освещение интерьера. Уровень естественного освещения снижают тонированное остекление, занавеси, архитектурные выступающие элементы здания и деревья за окном (особенно вечнозелёные). Если при проектировании с использованием световых проёмов естественное освещение неравномерно, необходимо использовать системы электрического освещения с их возможностями светораспределения. Следует тщательно выбирать варианты остекления и специальных покрытий. На рис. 3 схематично показано типичное сечение стеклянной части трёх наиболее часто используемых конструкций остекления атриумов, а также показывает элементы системы естественного освещения и то, как происходит освещение растений в интерьере [7–9].

## 2.3. Остекления

Допускаются три варианта остекления: 1) трёхслойный ламинированный стеклопакет, состоящий из внутреннего и наружного стёкол толщиной 1,9 мм и поливинилбутиральной прослойкой между ними толщиной 0,762 мм; 2) изделие компании DuPont «Sentry Glass», содержащее поливинилбутиральный слой толщиной 0,762 мм с защитной плёнкой и стекло толщиной 3 мм (1/8"); 3) двухслойный стеклопакет толщиной не более 12 мм с поливинилбутиральным слоем. На рис. 4 показано спектральное пропускание данных систем остекления. При этом пропускание УФ излучения необходимо для животных и некоторых цветов и является ключевым критерием в выборе системы остекления [8].

## 2.4. Источники света

Электрические системы освещения отвечают части или большинству требований по уровню освещения интерьерных растений. Уровень освещённости, по справочнику [10], должен составлять 250–750 длк, в зависимости от вида растений. Однако эти требования не менялись при трёх переизданиях справочника. Для активации всех жизненных функций растений желателен широкий спектр излучения (по крайней мере, 400–800 нм). Наблюдения и измерения не обнаружили видимого преимущества использования специальных растительных ИС в атриумах или внутренних пространствах в случае акклиматизированных растений, а их

<sup>3</sup> Воздушная масса – это отношение оптической толщины слоя воздуха в данном направлении (здесь – в направлении на солнце) и в направлении на зенит. — Прим. ред.



гормонов растений) определяются при красном свете. В зелёной области спектра фототропический эффект очень слаб. Фототропизм может проявляться и при очень низких освещённостях. Следует напомнить, что фотохимическое действие света на растения определяется их энергетической экспозицией. Фонари верхнего света весьма подходят растениям с точки зрения фотоморфогенеза, способствующего росту растений в сторону ИС, и расположение ИС сверху от растения способствует поддержанию его естественной формы. Вертикально направленный свет способствует гармоничности формы растений, но доминирование вертикального освещения не исключает возможности дополнительного электрического освещения для компенсации односторонности освещения. Другим приёмом может быть поворачивание растения для равномерности роста всех сторон.

#### 4.1. Акклиматизация растений

Типичная освещённость в помещениях составляет 50–200 длк. Освещённость в 1 длк (10 лк, приблизительно 1 фут-свеча) эквивалентна (98–99)-процентному уровню затенения. При этом уровень затенения – термин, используемый производителями тканевых или пластиковых покрытий, особенно применяемых для регулирования солнечной экспозиции растений, и проектировщиками интерьерного озеленения для выражения степени ослабления солнечного света в процентах. Выпускаемые покрытия имеют разные уровни затенения, подходящие для акклиматизации разных растений. Затенение в 47% означает, что покрытие пропускает 53% потока солнечного излучения. Акклиматизация растения в месте его установки в интерьере не отличается от его акклиматизации в условиях сильного затенения. В обоих случаях опадает много листьев (подобно опадению листьев, например, фикуса Бенджамина и актинофиллы Брассайя). И это приводит к тому, что растение истощает свои пищевые запасы для восстановления потерянной листвы. Если растения продолжают оставаться при слабом освещении, то никогда не смогут восстановить свои истощённые пищевые запасы. Настоятельно рекомендуется не начинать аккли-



Рис. 9. Внешний вид интерьерного тропического растения

матизацию растений в месте их установки до тех пор пока не обеспечено их дополнительное освещение в адаптационный период.

#### 4.2. Требуемая освещённость

Важнейший фактор в интерьерном озеленении – уровень освещения растений. При этом, например, достаточное количество света должно доходить не только до деревьев, но и до почвопокровных растений под ними. Энергию излучения, нужную интерьерным растениям, даёт их освещение в течение 12 ч в сутки при уровнях освещённости минимум в 70–100 длк. В плане естественного освещения, это возможно, например, при коэффициенте естественной освещённости 10–20% и освещённости (на открытой площадке) от стандартного неба пасмурного зимнего дня в 1500 длк. Это не может обеспечиваться всегда, необходимо применять дополнительные ИС. Желательно, чтобы они на ночь выключались, поддерживая нормальный суточный ритм. От того, как естественный свет поступает в помещение, зависит уровень естественного освещения и характер роста растений. Яркость неба в зените выше, чем у горизонта, и фонари верхнего света дают поэтому в 2–3 раза большую естественную освещённость, чем вертикальное остекление.

Уровни освещённости для поддержания жизнедеятельности интерьерных растений подразделяют на три группы:

1) низкий (100–150 длк или фут-кандел): филодендрон, золотая аглаонема, драцена душистая;

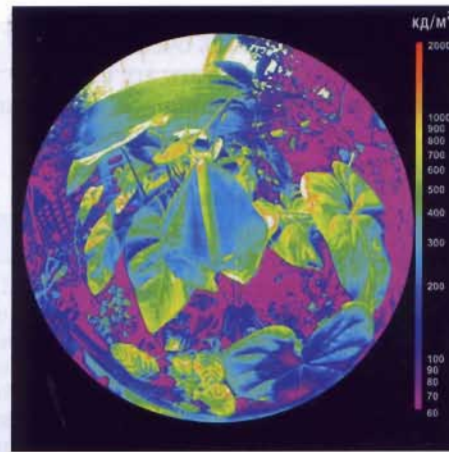


Рис. 10. Яркостное изображение растения по рис. 9 при естественном освещении

2) средний (150–250 длк или фут-кандел): аспарагус ферн, драцена зелёная, фикус каучуконосный;

3) высокий (250–350 длк или фут-кандел): норфолкская сосна, зонтичная пальма, подокарпус.

#### 4.3. Методы расчёта и их применение

Продолжительность зимнего светового дня приблизительно втрое меньше летнего при более низком солнце и более частой облачности. Удлинение светового дня с помощью электрических ИС значительно устраняет дефицит естественного света зимой. (Общая суточная экспозиция равна произведению освещённости (длк) на время освещения (ч). Пример: 200 длк × 12 ч/сут. = 2400 длк·ч/сут.)

Основная проблема состоит в том, что листопадным растениям для восстановления листвы требуется гораздо больше времени при данном режиме освещения, чем если бы они прошли акклиматизацию при более оптимальных уровнях освещения (с добавлением 50-процентного затенения). Кроме того, температура и относительная влажность в месте расположения растения для их выращивания менее важны, чем условия его пребывания в питомнике (рассаднике). В последнем обычно больше условий для роста растения и легче может стимулироваться новый подрост. Следует напомнить, что после акклиматизации растения к условиям более слабого освещения, его уже непросто переакклиматизировать обратно. Посредством акклиматизации структура хлорофилла переходит в более функци-



ональное высокочувствительное состояние и может быть очень опасным для растения подвергать эту структуру сильному освещению.

Фактически, исследованиями показано, что даже освещённости в 2000–3000 длк или фут-кандел могут губить экспонируемый хлорофилл. Растения могут получать солнечный ожог при нахождении на открытом солнце или обжигать верхушку при слишком близком расположении от мощного светильника. Чем ближе растение к ИС, тем слабее должно быть освещение, что специально должно учитываться при определении высоты подвеса светильника над растением. Некоторые акклиматизированные растения могут переакклиматизироваться к условиям прямого солнечного освещения. Однако это должно осуществляться постепенно с изменением освещённости от нескольких сотен до тысяч декалюкс и это может занимать до шести месяцев. Использование фильтров могло бы помогать в этом процессе.

Для поддержания нужного режима освещения деревьев в местах их расположения в качестве расписания работы системы освещения с учётом тёмного/ночного периода суток (с применением светофильтров и светорегуляторов) должна использоваться годовая таблица восходов и заходов солнца. Некоторую сложность представляют интегральные измерения параметров видимого и общего излучений неба и солнца (реальных или имитируемых). В светотехнической литературе в основном критерием уровня освещения растений считается освещённость (в люксах, декалюксах или фут-канделах). Как отмечено выше, растения особенно чувствительны к излучению на длинах волн короче 550 нм (хотя атриумы и торговые зоны с фонарями верхнего света или оконным остеклением рассчитываются на отсутствие в них излучений только с длинами волн короче 400 нм). Корригированные фотоэлементы имеют меньшую чувствительность в районе 400 нм, чем – 550 нм. Использование измерителей энергетической освещённости повышает как точность дозирования электрического освещения в случае ИС с разными спектрами излучения, так и точность оценки эффективности осветительных систем со смешанным излучением.

## 5. Заключительные замечания

Ключевые факторы содержания растений в интерьере:

1) акклиматизированные растения; 2) отсутствие заболеваний и насекомых; 3) отсутствие повреждений при транспортировке; 4) отсутствие побегов и поверхностных капель воды.

Для получения выгоды от смешения электрического и естественного освещения в выращивании интерьерных растений и достижения успехов в проектировании интерьерного озеленения необходимы надлежащие:

1) консультации бригады проектировщиков (архитектор, проектировщик интерьерного озеленения, проектировщик-строитель, фотобиолог);

2) отбор растений (в соответствии с уровнем освещения и культурной средой);

3) акклиматизация (адаптация) растений к внутренней среде;

4) размещение растений;

5) цветоводческий уход за растениями (квалифицированный садовник для ухода за растениями).

Разработки новых систем освещения окажут большое влияние на интерьерное озеленение, и уже создан новый рынок растениеводства в коммерческих зданиях. Рост числа базовых исследований в этой области проектирования вносит вклад в новые области применения естественного освещения и прикладных исследований по выращиванию растений.

Данный проект финансируется Исследовательской лабораторией по проектированию устойчиво развивающихся систем при Колледже архитектуры и градостроительства им. А.А. Таубмана Мичиганского университета. Отдельная благодарность выражается Майку Хоммелу за его помощь в обеспечении возможности работы в Ботаническом саду Мичиганского университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pitts, D. G., et al. Environmental Vision. – Bullerworth Heinmann. ISBN 0750690518.
2. Navvab, M., M. Karayel, M., Ne'eman, E., Selkowitz, S. Luminous Efficacy of Daylight// National Lighting Conference Proceedings. – CIBSE, 1988. – P. 409–420.
3. Navvab, M., Karayel, M., Ne'eman, E., Selkowitz, S. Daylight Availability Data for San Francisco// Energy and Buildings. – 1984 a. – Vol. 6. – P. 273–281.
4. Karayel, M., Navvab, M., Ne'eman, E., Selkowitz, S. Zenith Luminance for Daylighting Cal-

culations// Energy and Buildings. – 1984. – Vol. 6. – P. 283–291.

5. Navvab, M., Karayel, M., Ne'eman, E., Selkowitz, S. Analysis of Atmospheric Turbidity for Daylight Calculation// Energy and Buildings. – 1984 b. – Vol. 6. – P. 293.

6. Sliney, D.H., Marshall, W.J., Carothers, M.L., Kaste, R.C. Hazard Analysis of Broad-band Optics Sources. – Aberdeen Proving Ground, MD: US Army Environmental Hygiene Agency, 1980.

7. Bush-Brown, L. American garden Book. – N.Y.: Macmillan Inc., 1996. ISBN 0–02–860995–6.

8. Navvab, M., et al. Solar and daylighting and airflow performance of botanical garden. – ASES, 2005.

9. Mpelkas, C. Horticultural Light Sources// Sylva Engineering Bulletin. – 1981. – May, O-352.

10. IESNA Handbook. – New York, 1994; New York, 2001.

11. Bickford, Elwood D., Stuart, D. Lighting for Plants Growth. – The Kent State University Press, 1973. ISBN 0–87338–116–5.

12. Thimijan, R.W., Heins, R.D. Photometric radiometric and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion// Hort Science. – 1983. – Vol. 18, № 6. – P. 818–822.

13. Hirota, H., Shiozawa, K. Influence of Shading on the Initial Growth of Turf (in Japanese)// Turf Studies. – 1984. – Vol. 1305, № 1.

14. Tazawa, S. Application of Artificial Luminous Source to Growing Plants (in Japanese)// Journal of The Illuminating Engineering Institute of Japan. – 1996. – April.

15. Rogers, N. J. Methods for growing turf grass indoors under reduced light conditions// USP № 5,617,671.

16. Rogers, N. J., et al. The Sport Turf Management and Research Program at Michigan State University// Safety in American Football. – E. Hoerner (ed.). – ASTM, STP, 1996. – P. 132–144.

17. Navvab, M., Prayhoonang, C. Application of the New Standards for the Evaluation of Daylight and Solar Availability Measurements// Journal of the Illuminating Engineering Society. – 1995. – August. – P. 113–130<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Ссылка на эту статью в тексте отсутствует. – Прим. ред.



**Мойтаба Навваб (Mojtaba Navvab)**, доктор философии. Преподаватель Колледжа архитектуры и градостроительства им. А.А. Таубмана Мичиганского

университета. Член Североамериканского светотехнического общества (IESNA). Член Международного редсовета журнала *Lighting Research and Technology*. Лауреат многочисленных премий IESNA и Американского института архитектуры (AIA)