

УДК 630.161.32

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫРУБКИ НА РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

© 2009 А.В. Ольчев¹, К. Радлер²

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва;
e-mail: aoltche@gmail.com

²Отдел Биоклиматологии, Институт Бюсгена, Университет Георга-Августа, ФРГ, Геттинген;
e-mail: kradler1@gwdg.de

Трехмерная модель Mixfor-3D была разработана для описания радиационного режима неоднородных разновозрастных древостоев. Горизонтальное разрешение модели - 2×2 м, вертикальное разрешение - 1 м, шаг по времени - 1 час. В рамках европейского проекта по изучению динамики лесных экосистем и возобновлению лесных ресурсов Mixfor-3D была использована для оценки влияния сплошной вырубki на радиационный режим лесной экосистемы. Выполненное сравнение результатов модельных расчетов с данными полевых измерений показало, что разработанная модель позволяет достоверно описать пространственную и временную изменчивость полей солнечной радиации при разных условиях освещения как внутри древостоя, так и на вырубке, и в дальнейшем может быть использована для решения различных теоретических и прикладных задач.

Ключевые слова: *трехмерная модель, радиационный режим, лесная экосистема, сплошная вырубка.*

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование лесных ресурсов, увеличение их продуктивности, а также устойчивости к ветровалам, заморозкам и вредителям требует проведение комплексных исследований, включающих экофизиологические, микроклиматические и почвенные наблюдения, а также развитие численных моделей микроклимата, пограничного слоя атмосферы и продукционного процесса. Очевидно, что подобные модели должны быть основаны на физико-биологических принципах и позволять максимально подробно описать процессы переноса радиации, тепла, водяного пара и углекислого газа в лесных экосистемах. При этом при рассмотрении процессов переноса в локальном масштабе, например в масштабе одной экосистемы, наиболее перспективный, очевидно, является модельный подход, предполагающий трехмерное описание структуры растительного покрова, а также переноса радиации, тепла, влаги и углекислого газа как внутри него, так и внутри приземного слоя атмосферы.

В рамках данного исследования была разработана трехмерная (3D) модель Mixfor-3D для описания радиационного режима внутри разновозрастного растительного покрова. Она была использована для оценки влияния сплошной вырубki на радиационный режим лесной экосистемы. Верификация модели была выполнена по данным микроклиматических измерений на небольшой вырубке (площадью около 2,4 га) в ельнике, расположенном на Золлинговской возвышенности в

Центральной Германии ($51^{\circ}46'N$, $09^{\circ}27'E$, 300 м н. у. м.) (рис. 1).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Разработанная Mixfor-3D модель состоит из нескольких тесно взаимосвязанных блоков, описывающих 3D структуру древостоя и 3D перенос радиации [4]. Горизонтальное разрешение модели - 2×2 м, вертикальное разрешение - 1 м. Основной шаг по времени - 1 час.

Для описания 3D структуры растительности Mixfor-3D использует данные о положении отдельных деревьев в древостое, их высоте, диаметре и высоте крепления кроны, диаметре ствола и вертикальном распределении фитомассы.

Для описания основных морфологических параметров различных пород деревьев в модели использованы аллометрические соотношения, обобщенные в работе [9]. Для описания длины кроны ели (h_{crown}) в модели было использовано соотношение, предложенное Претчем с соавт. [7]:

$$h_{crown} = h \cdot (1 - \exp(\alpha_1 - \alpha_2 \cdot h/DBH - \alpha_3 \cdot DBH))$$

где h - высота деревьев; DBH - диаметр ствола, измеренный на уровне груди; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - эмпирические коэффициенты, равные 0.376, 0.996, 0,022 соответственно. Аналогичное уравнение в модели было использовано и для параметризации h_{crown} бука и березы. Значения α_{1-3} были приняты равными 0,548; 0,109; 0,002; соответственно.

Проективная площадь поверхность листы отдельного дерева рассчитывалась в модели как

$$S_{tree} = \beta_1 \cdot DBH^{\beta_2},$$

где β_1, β_2 - эмпирические параметры. Согласно данным Гувера с соавт. [3], S_{tree} ели может быть достаточно точно аппроксимирована при значениях $\beta_1 = 0,134$ и $\beta_2 = 2,163$. Для бука значения $\beta_{1,2}$ равны 0,3073 и 1,803 [7], а для березы $\beta_{1,2} = 0,028$ и 1,430 [1].

Модельный алгоритм для отдельного дерева предполагает, что максимальная плотность фитомассы (LAD) расположена в верхней части кроны. Вертикальный профиль нормализованной LAD ($NLAD$) по суммарному листовому индексу (LAI) дерева при этом хорошо описывается следующим уравнением:

$$NLAD = \frac{\pi}{2 \cdot h_{crown}} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot z_{crown}}{h_{crown}}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z_{crown}}{h_{crown}}\right) \right)$$

где h_{crown} - высота кроны и z_{crown} - расстояние между некоторой высотой в пределах кроны и высотой крепления кроны. Сходное уравнение используется также и для описания вертикального профиля диаметра кроны. При моделировании LAD в пределах участка кроны предполагается, что LAD увеличивается по направлению от ствола к краям кроны. Минимальная LAD наблюдается в северной части кроны, и максимальная - в ее южной части.

Для модельных расчетов в рамках данного исследования было принято, что диаметр кроны ели в исследуемом ельнике составляет 6 м., а диаметр кроны бука в древостое, примыкающем к исследуемой вырубке с юго-восточной стороны - 10 м. (рис. 1). Средняя высота деревьев в древостоях - 34 м.

Алгоритм для описания солнечной радиации в модели учитывает перенос прямой и рассеянной радиации в древостое, включая радиацию, проникающую в просветы древесного полога, радиацию отраженную и рассеянную листвой, ветвями и стволами деревьев. Для учета влияния рельефа на радиационный режим древостоя в Mixfor-3D смоделированное 3D распределение фитомассы растительности совмещается с топографической картой местности.

Расчет прямой солнечной радиации внутри полога растительности основан на оценке вероятности (P_0) проникновения прямого солнечного луча в некоторую точку внутри растительности без рассеяния листвой [5]:

$$P_0(\mu) = \exp\left(-\frac{G(\mu_s) \cdot PAI}{\cos(\mu_s)}\right)$$

где μ_s - зенитный угол солнца и G is - косинус среднего угла между направлением на солнце и нормалью, проведенной от поверхности листа.

Для сферического распределения листьев, G не зависит от μ_s и равна 0,5.

Рассеянная солнечная радиация внутри полога рассчитывается с учетом рассеянной солнечной радиации, проникающей внутрь растительности через просветы в кроне деревьев от различных участков небосвода, а также прямой и рассеянной радиации, рассеянной листьями, ветвями и стволами деревьев.

Используя приближение об однородной яркости небосвода, вероятность проникновения рассеянной радиации внутрь полога (P_D) может быть рассчитана через вероятности проникновения прямых лучей (P_0) от различных точек небосвода как

$$P_D = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot \cos(\mu) \cdot \sin(\mu) \cdot d\mu.$$

Учитывая значения P_0 и P_D , суммарная радиация (Q) в некоторой точке полога растительности (x, y, z) может быть рассчитана как

$$Q(x, y, z) = S(x, y, z) + D(x, y, z) = S_0 \cdot P_0(x, y, z) + D_0 \cdot P_D(x, y, z) + Q_D(x, y, z)$$

где x, y и z - пространственные координаты, $S(x, y, z)$ и $D(x, y, z)$ - прямая и рассеянная солнечная радиация, поступившая к точке (x, y, z) без рассеяния фитоэлементами через просветы вышележащих ярусов растительности, $Q_D(x, y, z)$ - приходящая солнечная радиация в точке (x, y, z) рассеянная листьями, ветвями и корой деревьев вышележащих ярусов.

Полусферическое отражение и рассеяние солнечной радиации в видимом (PAR) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах рассчитываются для каждой ячейки внутри полога растительности с использованием двухпоточкового приближения [2, 6], учитывающего локальные значения LAD , а также оптические спектральные свойства фитоэлементов. Суммарный поток радиации для каждой ячейки внутри растительности рассчитывается от верхнего к нижнему слою растительности с помощью пошагового алгоритма.

МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Микроклиматические исследования на вырубке в Золлинге проводились в 2005-2006 гг. с помощью 5 мобильных метеостанций. Одна метеостанция была расположена в центре вырубки, а остальные - на расстоянии 10-15 м. от северо-западной (NW), северо-восточной (NE), юго-западной (SW) и юго-восточной (SE) границ леса (рис. 1). Дополнительная контрольная метеостанция располагалась внутри полога леса на расстоянии около 150 м. к северо-западу от вырубки. На каждой станции проводились измерения сум-

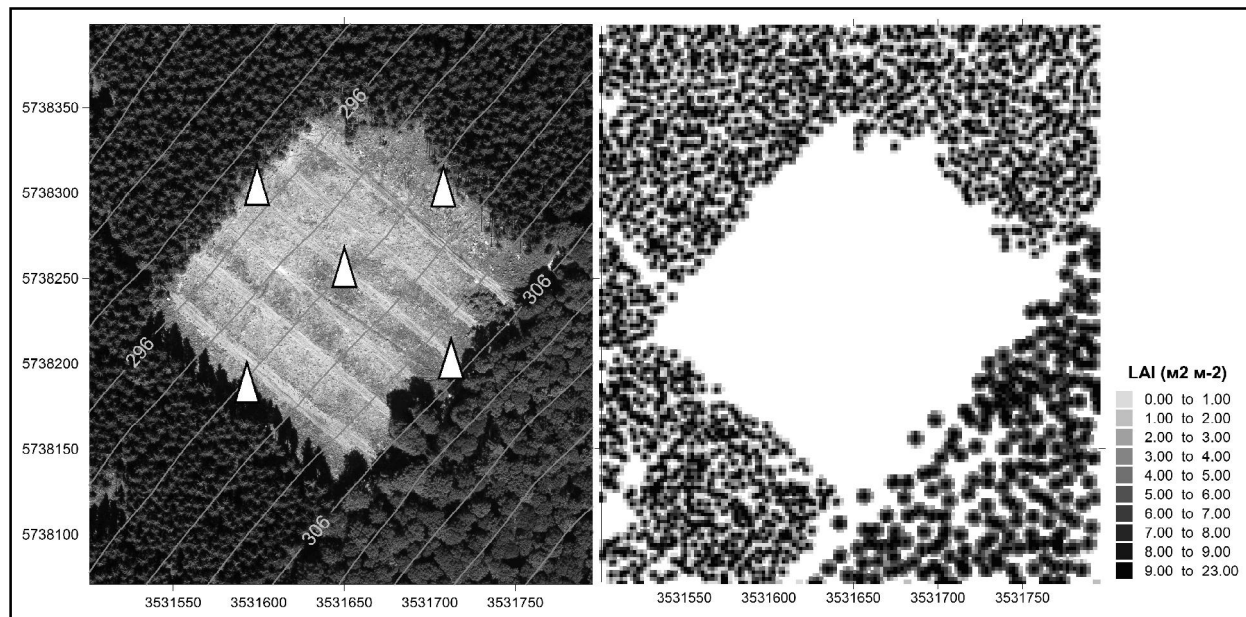


Рис. 1. Аэрофотоснимок исследуемой экосистемы и смоделированное распределение листового индекса (LAI) в древостое вокруг вырубке. Белые треугольники отмечают положение метеостанций на вырубке

марной солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, количества осадков, скорости и направления ветра на высоте 2 м. над поверхностью почвы. Кроме того, на станциях измерялась температура почвы на глубине 10 и 20 см. Измерения проводились синхронно с частотой 1 секунда и усреднялись за 5-минутные интервалы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для описания пространственной и временной изменчивости солнечной радиации на вырубке и внутри окружающего вырубку древостоя, а также для проверки модели по экспериментальным данным, был выбран тестовый период с июня по август 2005 г. Метеорологические условия в течение этого периода отличались значительной изменчивостью, что позволило оценить чувствительность модели не только к изменению высоты солнца, но также и к изменению соотношения прямой и рассеянной радиации в падающем потоке.

Для проверки модели использовались данные измерений радиации на 4 станциях, расположенных в различных частях вырубке, а также измерения на контрольной станции внутри леса. Сравнение смоделированных и измеренных значений проводилось как для среднечасовых, так и для среднесуточных значений радиации.

Результаты выполненных модельных и экспериментальных исследований показывают, что сплошная рубка оказывает значительное влияние на радиационный режим лесной экосистемы

(рис. 2). Максимальные значения радиации, приходящей к земной поверхности, за исследуемый трехмесячный период были получены в центральной и северо-западной частях вырубке и достигали 1300-1450 МДж м⁻². Приходящая радиация в южной и юго-восточной части вырубке была значительно ниже и изменялась в пределах от 800 до 1200 МДж м⁻². Внутри полога леса солнечная радиация не превышала 180-240 МДж м⁻².

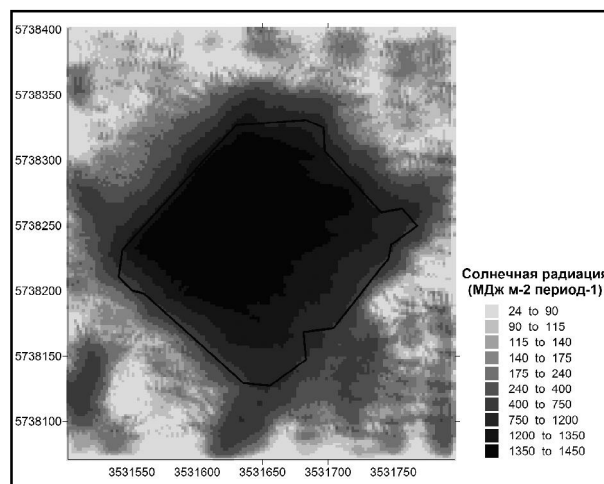


Рис. 2. Смоделированная суммарная солнечная радиация на уровне земной поверхности для исследуемой вырубке и окружающего древостоя в период с 01.06 по 31.08.2005 г. Черная линия отмечает условную границу вырубке и окружающего ее древостоя

Суточная динамика солнечной радиации, приходящей на различные участки вырубке, в значительной степени определялась соотношением

в падающем потоке прямой и рассеянной радиацией, а также затенением вырубki окружающими деревьями. В дни с преобладанием рассеянной радиации в суммарном потоке распределение радиации на вырубке было довольно одно-

родным. С другой стороны, в безоблачные солнечные дни неоднородность распределения солнечной радиации в пределах вырубki была максимальной в основном за счет затенения участков вырубki окружающими деревьями.

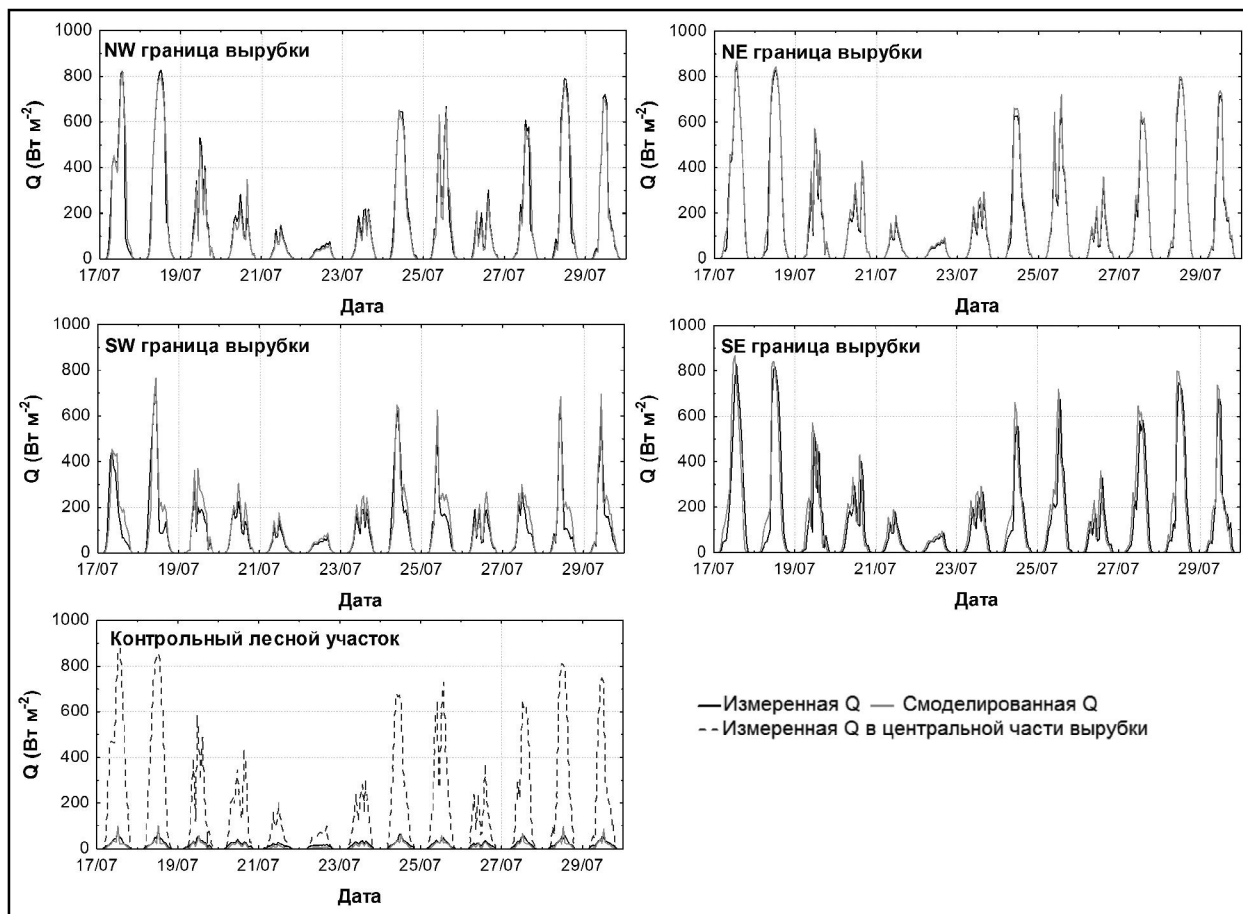


Рис. 3. Сравнение смоделированной и измеренной солнечной радиации (Q) на краях исследуемой вырубki (NE, NW, SW и SE), а также на контрольном лесном участке для периода с 17.07 по 31.07.2005 г.

Сравнение результатов модельных расчетов среднесуточных и среднечасовых значений солнечной радиации с результатами полевых наблюдений показало, что разработанная модель Mixfor-3D позволяет достаточно точно смоделировать динамику солнечной радиации как внутри вырубki, так и внутри окружающего вырубку древостоя (рис. 3).

Наилучшее соответствие между смоделированными и измеренными значениями солнечной радиации было получено для северо-восточных и северо-западных участков вырубki, где коэффициент детерминации r^2 для среднесуточных значений достигал 0,99. Значения r^2 для среднечасовых значений солнечной радиации на NE и NW границах вырубki составляли 0,99 и 0,96 соответственно (рис. 3). На юго-восточной и юго-западных границах вырубki значения r^2 были несколько ниже и не превышали 0,92 для среднечасовых и 0,98 и 0,97 для среднесуточных значе-

ний соответственно. Коэффициент детерминации между смоделированными и измеренными значениями на контрольной станции, расположенной под пологом леса, был около 0,79.

Более низкие значения r^2 между смоделированными и измеренными значениями на SE и SW участках, и особенно на контрольном участке, могут быть объяснены значительной неоднородностью поля прямой солнечной радиации, проникающей сквозь кроны деревьев в древостое и на опушках. Очевидно, что структура растительного покрова, и в частности крон отдельных деревьев, генерируемая моделью несколько отличается от реальной структуры древостоя. Разработанная модель использует осредненные значения LAD внутри отдельной модельной ячейки (2 м × 2 м × 1 м), в то время как в реальном покрове фитомасса деревьев распределена в пределах модельной ячейки крайне неоднородно. Подобные различия в распределении фитомас-

сы в реальном и модельном древостое, очевидно, могут привести к занижению смоделированной вероятности проникновения прямых солнечных лучей внутрь растительного покрова без рассеяния, а также к занижению модельных оценок поглощения и рассеяния солнечной радиации фитомассой деревьев внутри модельной ячейки.

Другое возможное объяснение полученных различий связано с методикой измерений солнечной радиации под пологом растительности и на вырубке, использованной в рамках данного исследования. Учитывая, что за счет ажурности крон поля солнечной радиации под пологом растительности отличаются значительной неоднородностью, точечные измерения солнечной радиации, проводимые с помощью единичного датчика радиации, не могут достаточно достоверно описать поле радиации внутри достаточно большой модельной ячейки (2 × 2 м). Кроме того, необходимо учитывать также и различия во временном разрешении модели (1 час) и полевых измерений (часовое осреднение 5-минутных значений). Подобные различия могут оказывать существенное влияние на суммы приходящей радиации, особенно на границе между освещенной частью земной поверхности и поверхностью, затененной окружающими деревьями, за счет изменения часового угла солнца и высоты солнца над горизонтом.

Возможным решением данной проблемы может служить уменьшение пространственного разрешения модели, например, до размеров ячейки (1 × 1 × 1 м), а также уменьшение шага по времени. Однако надо учитывать, что подобные изменения могут вызвать значительное замедление процедуры расчета по модели.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологические ресурсы России: Фундаментальные основы рационально-

го использования» (грант П.4.8), гранта РФФИ (№ 08-04-01254-а) и гранта Научного Немецкого Общества, DFG (Gr 738/16-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bugmann H.K.M.* On the ecology of mountainous forests in a changing climate: A simulation study // 1994 PhD Thesis 10638, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland
2. *Dickinson R.E.* Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance // *Advances in Geophysics* 1983. V. 25. P. 305-353.
3. *Gower S.T., Reich P.B., Son Y.* Canopy dynamics and aboveground production of five tree species with different leaf longevities // *Tree Physiol.* 1993. V. 12. P. 327-345
4. *Olchev A., Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G.* Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature // *Ecological Modelling.* 2009. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.02.004
5. *Myneni R.B., Ross J., Asrar G.* A review on the theory of photon transport in leaf canopies // *Agric. For. Meteorol.* 1989. 45. P. 1-153
6. *Pinty B., Lavergne T., Dickinson R.E. et al.* Simplifying the interaction of land surfaces with radiation for relating remote sensing products to climate models // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, D02116.
7. *Pretzsch H., Biber P., Dursky J.* The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation // *For. Ecol. Management* 2002. V. 162. P. 3-21
8. *Prskawetz M., Lexer M.J.* Evaluierung des Li-Cor LAI-2000 zur Ermittlung des Blattflaechenindex in Buchenjungbeständen // *Allg. Forst Jagdzeit.* 2000. V. 171. P. 185-191.
9. *Widowski J.-L., Verstraete M.M., Pinty B., Gobron N.* Allometric relationships of selected European tree species // *Rep. EUR 20855 EN, Joint Res. Cent., Ispra, Italy,* 2003.

APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL TO DESCRIBE EFFECT OF CLEAR-CUTTING ON RADIATION REGIME OF O FOREST ECOSYSTEM

© 2009 A.V. Olchev¹, K. Radler²

¹ A.N. Severtzov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Science Moscow

² Department of Bioclimatology, Buesgen Institute, Georg-August University, Germany, Goettingen

Three-dimensional model Mixfor-3D is developed to describe radiation regime of uneven-age forest stands. Horizontal resolution of the model - 2 m × 2 m, vertical resolution - 1 m, time step - 1 hour. It was applied to describe the impact of a clear-cutting on radiation regime within the framework of European project focused on study of forest ecosystem dynamics and regeneration of forest recourses. Comparisons of results of modeling experiments with field measurements show, the developed model allows describing adequately the spatial and temporal variability of solar radiation pattern under different light conditions both within the forest stand and in the clear-cut area. The model can be used to solve different theoretical and applied tasks.

Keywords: *three-dimensional model, a radiating mode, a wood ecosystem, continuous cutting down.*