

Моделирование освещённости объектов на земной поверхности по данным космической съёмки

Рихтер А.А., к.т.н., м.н.с. (1), Мурынин А.Б., к.т.н., вед.н.с. (1, 2)

(1) НИИ "АЭРОКОСМОС", Москва, РФ

(2) ФИЦ ИУ РАН, Москва, РФ

Докладчик – Рихтер Андрей Александрович

Работа поддержана Минобрнауки РФ, проект RFMEF158317X0061.

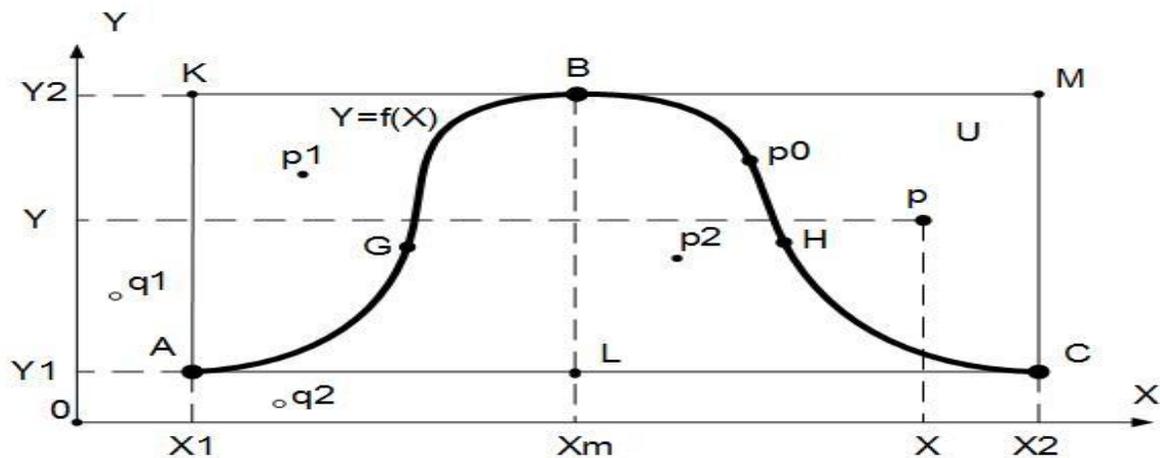
Работа поддержана грантом РФФИ №16-51-55019.

Индекс реакции растительности на освещённость

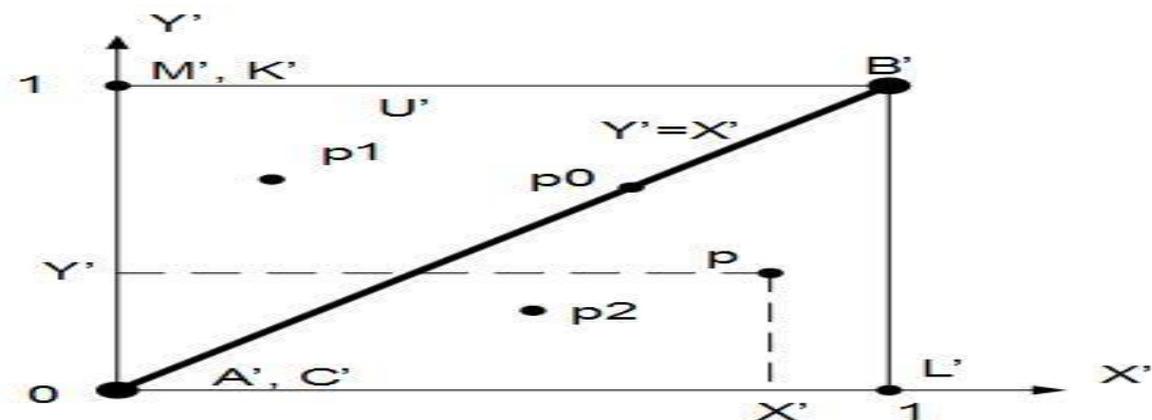
Постановка задачи

- Освещённость - световой поток, приходящийся на единицу площади некоторой поверхности. С точки зрения космического мониторинга освещённость от Солнца (источника освещения поверхности земли) можно оценить нормальной составляющей вектора светового потока на элементарную площадь поверхности с учётом или без учёта её рельефа в точке (пиксели оптических или радарных изображений) .
- В рамках космического мониторинга рассмотрим следующие аспекты оценки освещённости:
 - Индексы реакции растительности и почвы на освещённость;
 - Освещённость в окрестности крупных свалок;
 - Освещённость в окрестности застройки;
 - Построение 3D-моделей ригидных объектов по косвенным изображениям;
 - Пространственное моделирование и оценка освещённости объектов земной поверхности;
 - Проектно-исследовательские работы в системе общего образования в области 3D-моделирования и оценки освещённости (на примере работы Дементьева И.А. в программной среде 3ds-max, ГБОУ СОШ г. Москвы № 97).

Факторы и реакции окружающей среды



X и Y – значения фактора и реакции в некоторой точке поверхности земли, выражаемые в физических или условных единицах, X' и Y' – их значения, приведенные к диапазону $[0, 1]$. X_1 и X_2 – наименьшее и наибольшее (наихудшие, критические) значения фактора, при которых объект может существовать, X_m – наилучшее (оптимальное) значение фактора для объекта, Y_1 и Y_2 – минимальная (наихудшая) и максимальная (наилучшая) реакции объекта на фактор. Вне области выживания U , например, точки q_1 и q_2 не могут принадлежать объекту O . Точки A, B, C, G, H – характерные точки на графике $f(X)$, точки K, L, M – характерные точки области U , $[X_1, X_2]$ – границы выживаемости объекта по данному фактору, p – точки, принадлежащие объекту.



Функция $f(X)$ возрастает от A до B , т.е. рост фактора приводит к росту реакции на этом участке. От B до C функция убывает, т.е. рост фактора приводит к снижению реакции. Области увеличения скорости реакции от A до G и снижения скорости реакции от H до C при росте фактора полагаем областями негативных влияний фактора. Область от G до H – благоприятных влияний фактора. AC – диапазон выживания.

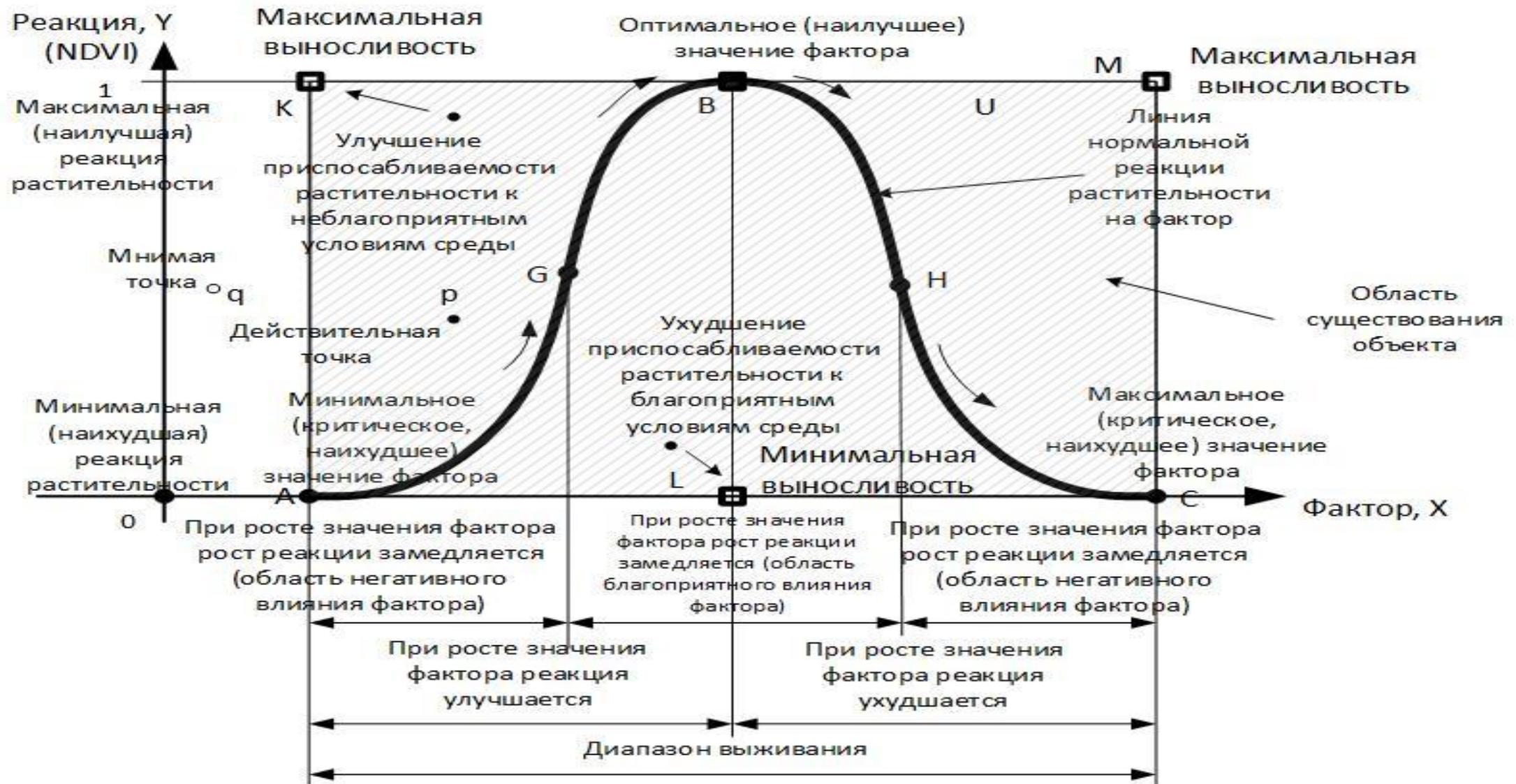
Полагаем, что X и Y могут быть выражены в виде каких-либо индексов подстилающей поверхности, полученных обработкой изображений (не только аэрокосмических).

$$D = X' - Y'$$

$$p: (x, y) \sim (X, Y), (X', Y')$$

$$X' = \begin{cases} \frac{X - X_1}{X_m - X_1}, & X < X_m \\ \frac{X_2 - X}{X_2 - X_m}, & X \geq X_m \end{cases}, \quad Y' = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1}$$

Зависимость между факторами, воздействующими на растительность, и реакцией растительности на эти факторы по космическим изображениям



Индексы реакции растительности и почвы



Основные факторы жизнедеятельности для растительности

$$\mathfrak{I} = X' - Y', \quad NDVI > 0$$

$$\mathfrak{N} = \frac{k}{k_m} \quad R = [\mathfrak{I}_1 \quad \dots \quad \mathfrak{I}_m]$$

$$T = [t_1 \quad \dots \quad t_m]$$

Критерии оценки состояния растительности

- $|\mathfrak{I}| \leq \varepsilon$ - нормальное состояние растительности
- $\varepsilon < \mathfrak{I} \leq 1$ - низкая выносливость растительности к внешним факторам
- $-1 \leq \mathfrak{I} < -\varepsilon$ - высокая выносливость растительности к внешним факторам

Критерии оценки состояния почвы

- $|\mathfrak{N}| \leq \mu$ - состояние растительности меняется незначительно
- $\mu < \mathfrak{N} \leq 1$ - состояние растительности ухудшается со временем
- $-1 \leq \mathfrak{N} < -\mu$ - состояние растительности улучшается со временем

\mathfrak{I} – индекс реакции растительности (ИРР), $\varepsilon \sim 0$

X – фактор, воздействующий на объект (растительность)

Y – реакция объекта на значения фактора

(X, Y – рассчитываются по космическим изображениям)

X' – нормированное значение фактора X

Y' – нормированное значение реакции Y

X_m – оптимальное (наилучшее) значение фактора

X_1, X_2 – минимальное и максимальное (наихудшие) критические значения фактора

Y_1, Y_2 – минимальное (наихудшее) и максимальное (наилучшее) значения реакции

(X_1, X_2, X_m, Y_1, Y_2 – рассчитываются)

\mathfrak{N} – индекс реакции почвы (ИРП), $\mu \sim 0$

R – временной ряд значений индекса реакции растительности (ИРР)

T – отчеты времени

k – коэффициент наклона линии регрессии

k_m – максимальное по модулю значение k по эталонной области

Фактор освещённости

Освещённость в точке зависит от: модели Земли (сфера, геоид, референц-эллипсоид и др.); рельеф и шероховатость поверхности; случайного распределения объектов поверхности; погодных и климатических условий (облачность, видимость и др.); пропускающей способности экранируемой поверхности.

Разные виды растительности имеют разные ареалы распределения, которым соответствуют разные режимы освещения (суточного, сезонного, хронологического), оптимального или допустимого для них. Растительному покрову – среднестатистический режим (как и для других факторов растительности).

Растительность имеет высотное и широтное распределение (модели леса, города, водоёма, горы и др. экосистем).

Для оценки характерных значений фактора освещённости (X_1, X_2, X_m) необходимо провести цифровую обработку большого массива изображений и найти распределение NDVI в зависимости от освещённости в каждой точке изображений.

i	N	Тип яруса	Характеристика
0	1	Внеярусная растительность	Вьющиеся лианы, эпифиты, водоросли
1	1-2	Подземный ярус	Корневая система растений, лесных почв, обитатели почвы (фауна, грибы, микроорганизмы и др.)
2	1-2	Лесная подстилка	Производные растений (опавшие листья, ветки, цветы, плоды, кора и др.) – мертвый покров, производные животных (фекалии, трупы животных, оболочки куколок, личинок и др.) – живой покров
3	1	Моховой	Мхи, лишайники
4	1	Травяной	Трава, кустарнички
5	1-2	Подлесок	Кустарники, низкие деревья
6	1-6	Древостой	Высокие деревья

Высотная проекция леса: i – номер типа, N – число ярусов (аналогично – для города)



Тимохово



Кучино



Белая Гора



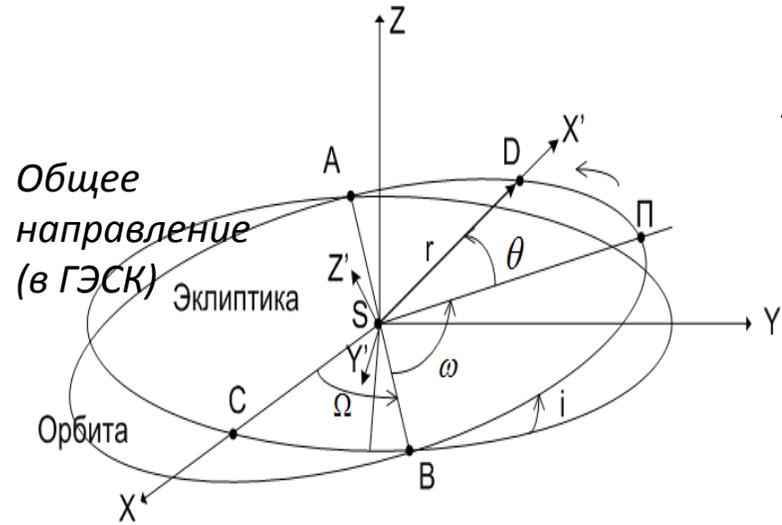
Зелёная Гора

Распределение растительности на поверхностях свалок (полигонов ТКО Московского региона)

S – освещённость, T – температура поверхности, ρ – плотность растительного покрова.

S и T коррелируют друг с другом и с ρ . Схемы распределения S , T и ρ для природных, продолжительных и стабильных во времени (горные, лесистые, озёрные и др. системы) и антропогенных, непродолжительных и нестабильных во времени (застройки, карьеры, свалки и др.) местностей различны. Распределение ρ меняется с высотой (на разных высотных ландшафтных поясах, уровень высоты которых зависит от широты местности), глубиной (на разных лимнологических зонах озёр, рек, морей и других форм водомассивов), расстоянием от высотного объекта (в зависимости от суточно-сезонной динамики тени от Солнца в окрестности объекта и систем объектов), положением на самом объекте (в зависимости от угла между нормалью к подстилающей поверхности и направлением на Солнце).

Оценка индекса освещённости



$$X = \frac{|\bar{r}|}{\max |\bar{r}|} \cos(\bar{r}, \bar{R})$$

Для ровной поверхности: Для неровной поверхности:

$$X = \cos H$$

$$X = \cos(\bar{n}, \bar{s})$$

X – индекс освещённости в точке $E(x, t)$

$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]$ – вектор места (x_1 – абсцисса, x_2 – ордината, x_3 – аппликата)

$t = [t_1 \ t_2 \ t_3]$ – вектор времени (t_1 – хронологическое, t_2 – сезонное, t_3 – суточное)

r – радиус-вектор центра масс Земли

R – радиус-вектор точки E

n – нормаль к поверхности в точке

s – направление на источник освещения (Солнце)

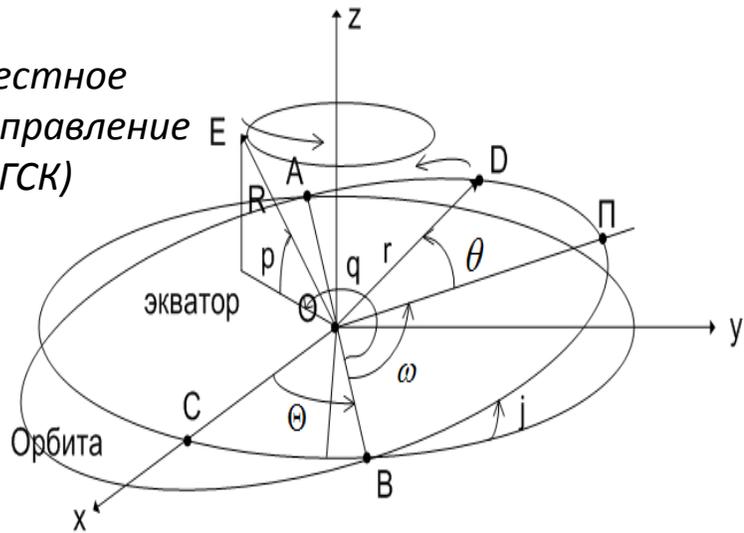
Критерии оценки:

$X > 0$ – источник виден с точки E (дневное время суток)

$X < 0$ – не виден (ночное время суток)

$X \sim 0$ – на линии горизонта (сумеречное время, рассвет или закат)

Местное направление (в ГСК)



Расчёт направленности излучения

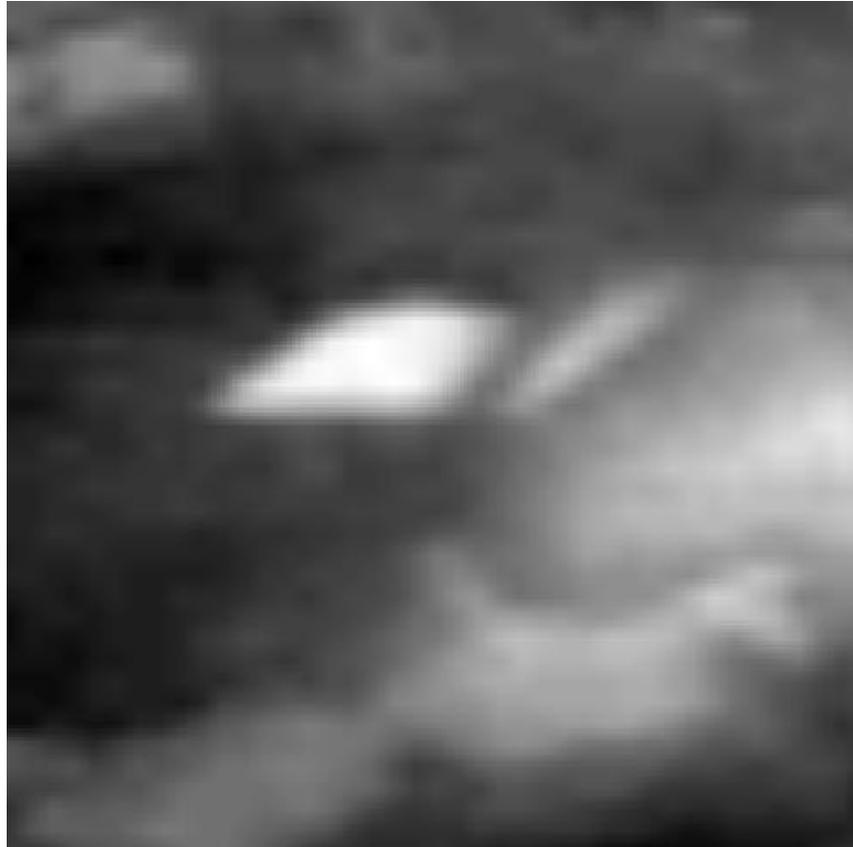
$SXYZ$ - гелиоцентрическая эклиптическая система координат (ГЭСК), $\{i, \Omega, \omega, e, a, \vartheta\}$ - элементы орбиты, D - текущее положение притягиваемого тела;

$Oxyz$ - геоцентрическая экваториальная система координат (ГСК), $\{j, \Theta, \omega, e, a, \vartheta\}$ - элементы орбиты, E - текущее положение места;

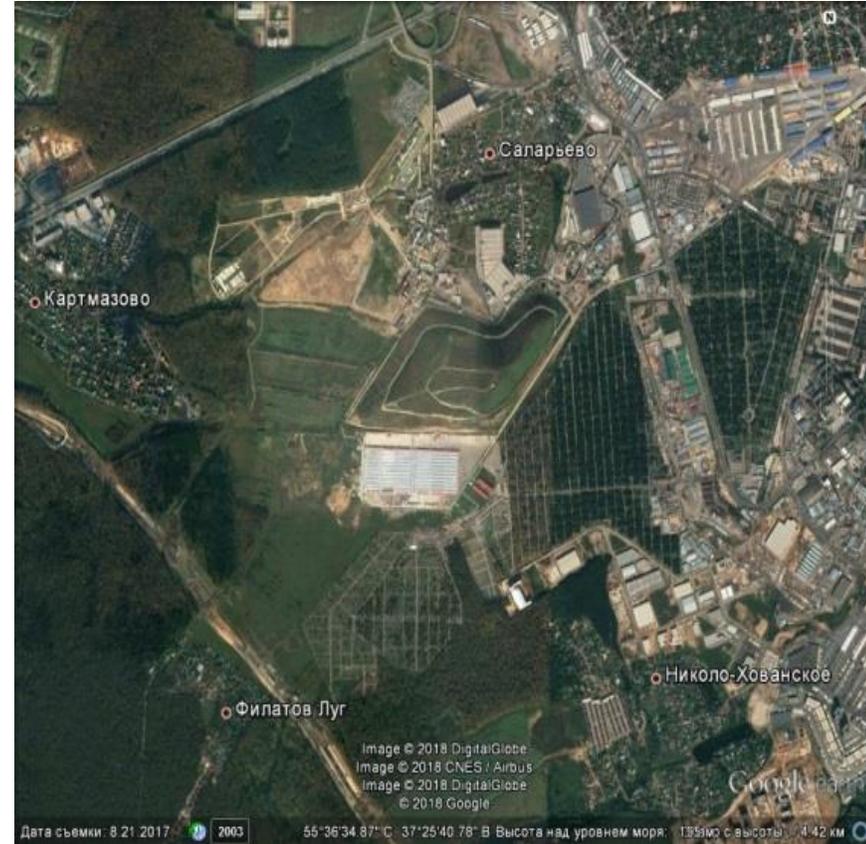
AB - линия узлов, P - перигелий, SP (ОП) - линия аписид, C - день весеннего равноденствия.

Оценка освещённости в окрестности свалок

Область наблюдения



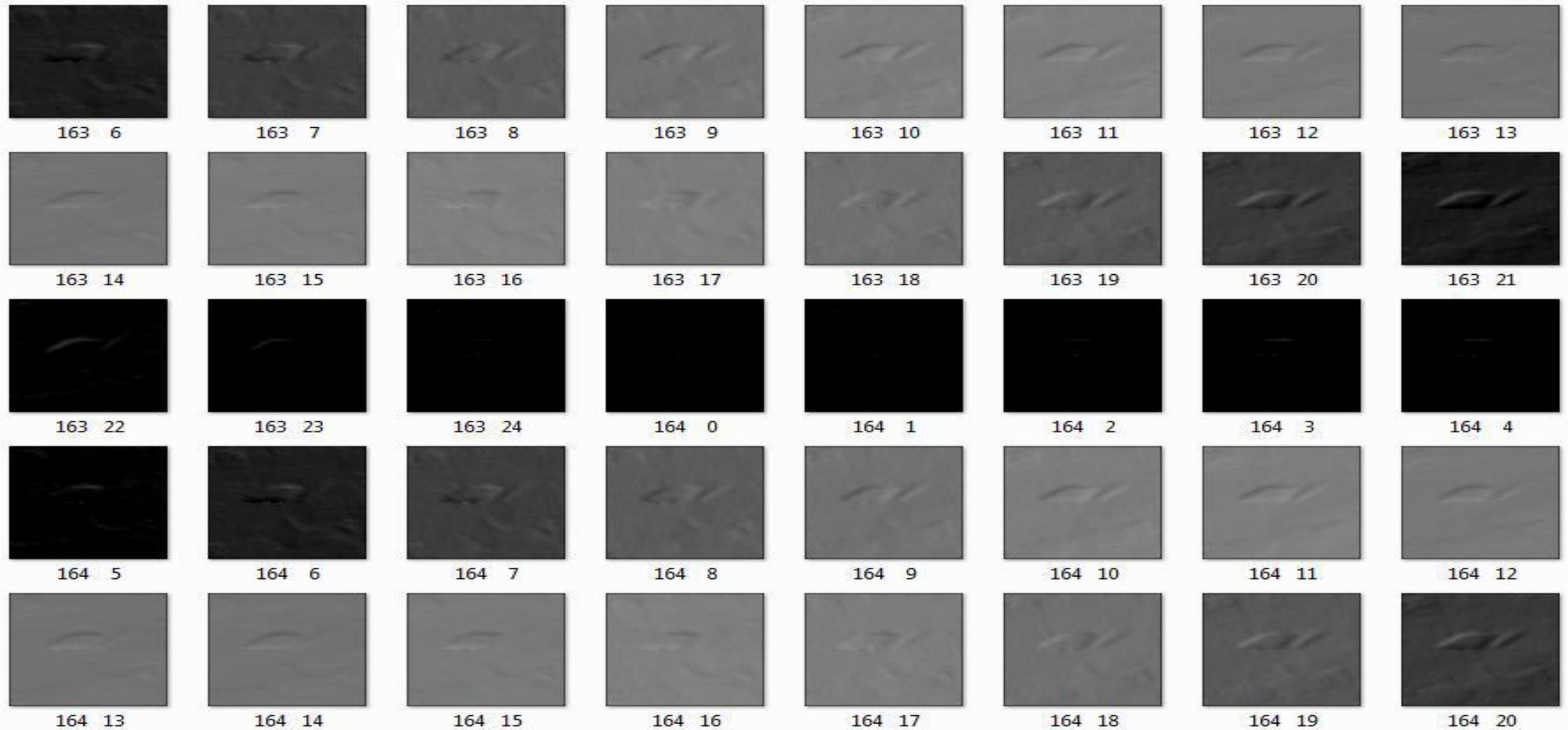
Радарное изображение (SRTM)



Оптическое изображение (Google Earth)

*Окрестность рекультивируемого полигона твёрдых коммунальных отходов (ТКО)
Саларьево, Ленинский район Московского региона*

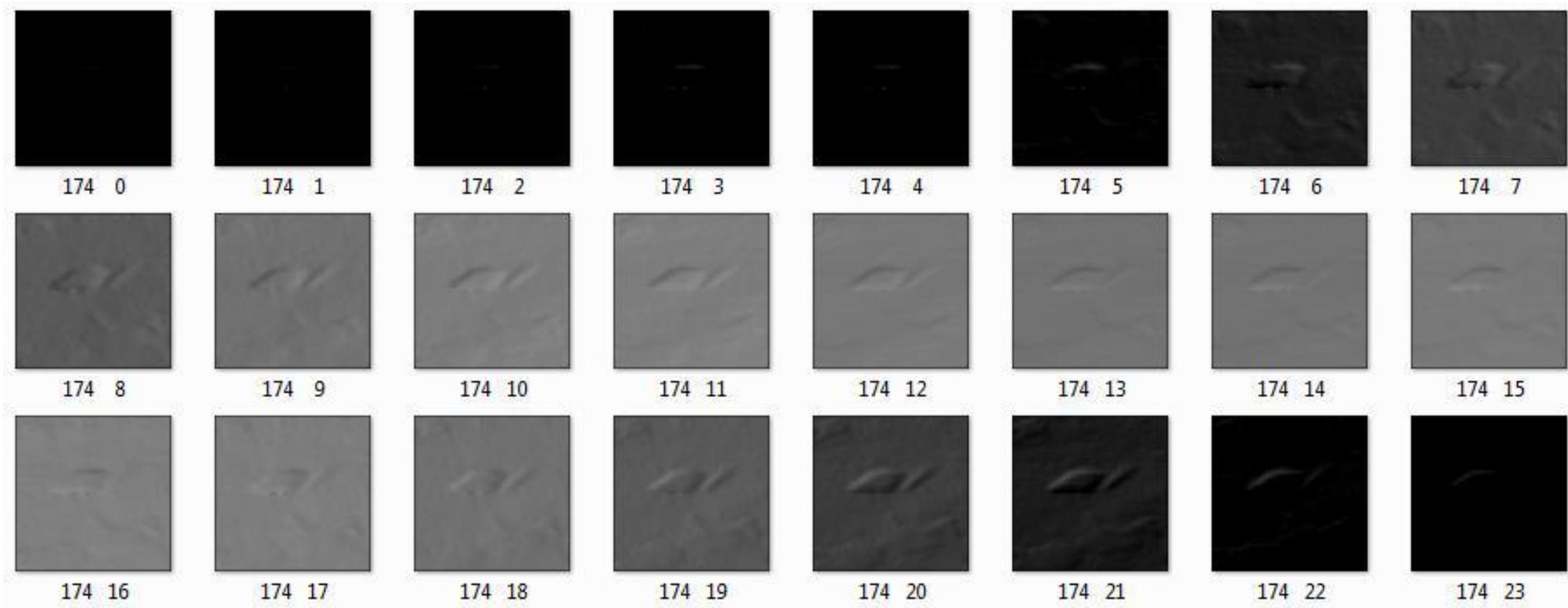
Изменение освещённости во времени



Хронологические изменения

(фрагмент, временное разрешение – 1 ч; формат файлов – “ $t \tau$ ”, t – день года, τ – время суток)

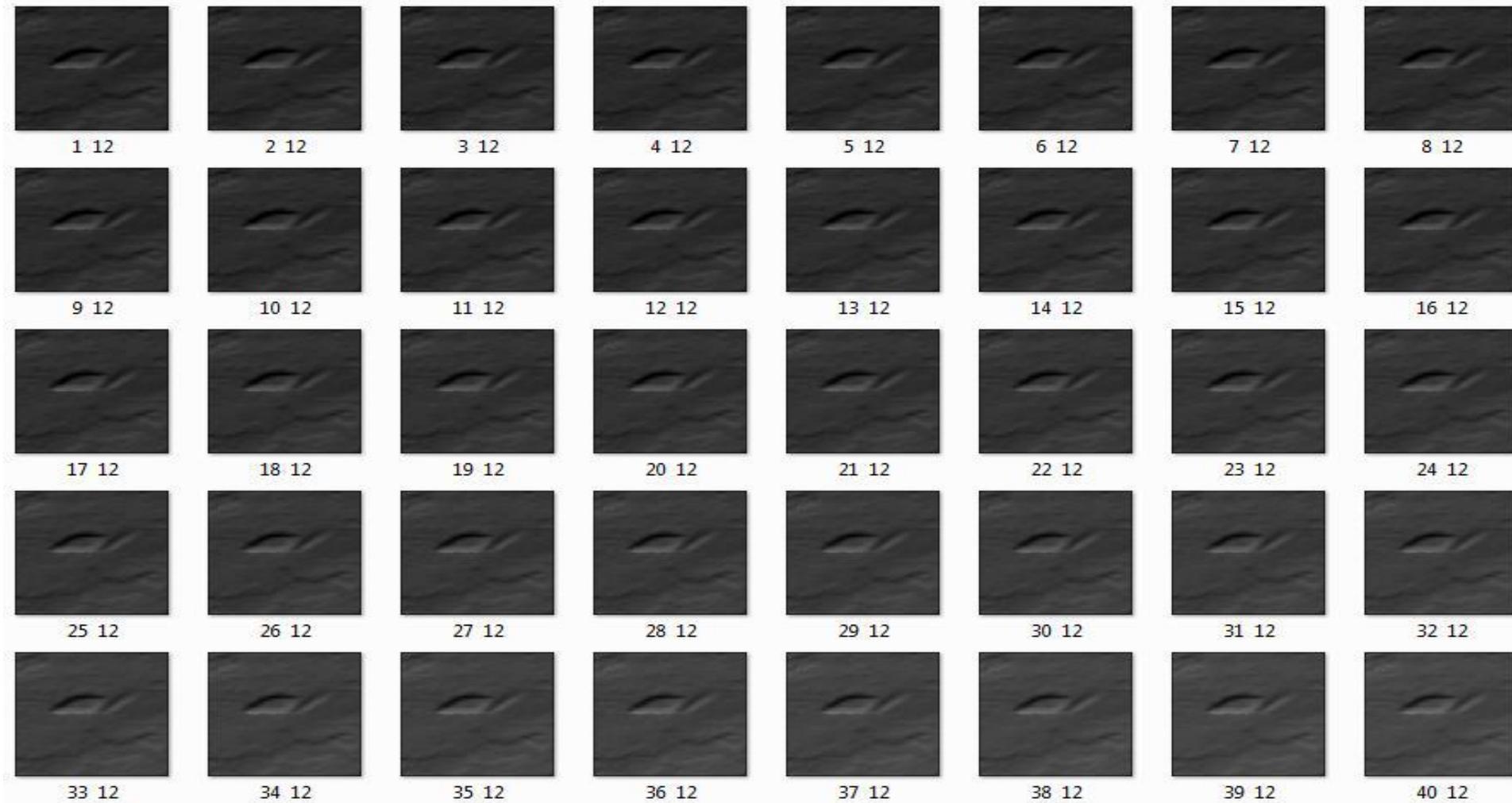
Изменение освещённости во времени



Суточные изменения

(22 июня, 0-23 ч., временное разрешение – 1 ч.; формат файлов – “ $t \tau$ ”, t – день года, τ – время суток)

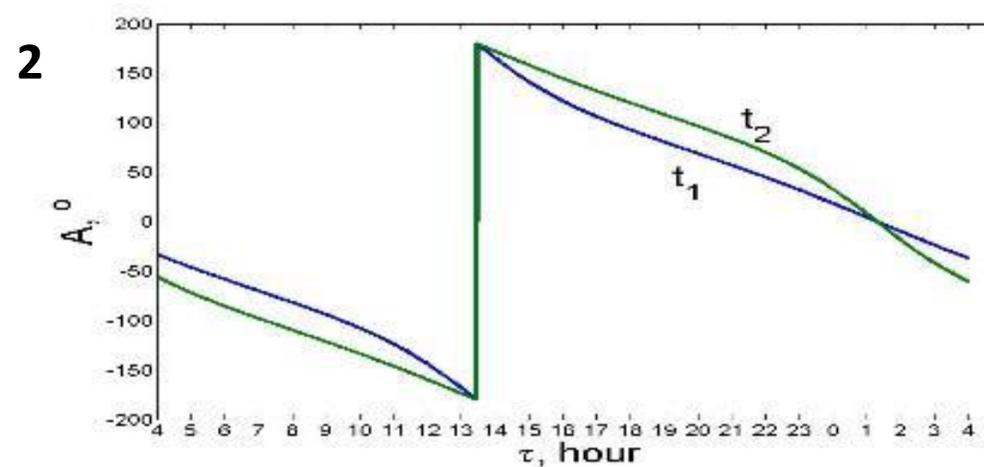
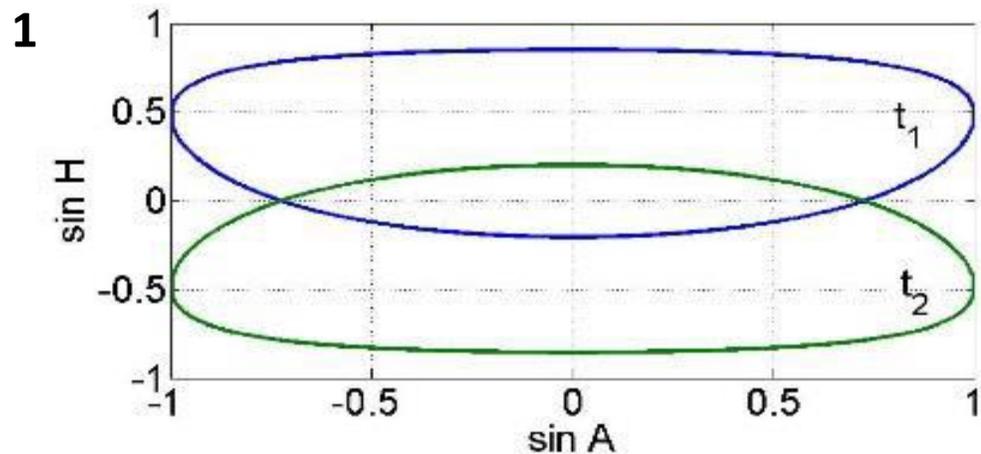
Изменение освещённости во времени



Сезонные изменения

(фрагмент, в 12 часов дня, 1-40 сут., временное разрешение – 1 сут.; формат файлов – “ $t \tau$ ”, t – день года, τ – время суток)

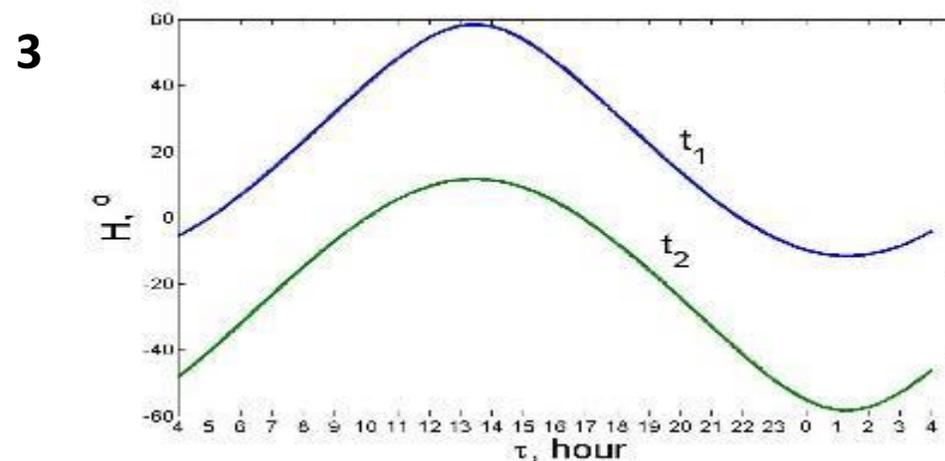
Характеристики освещённости



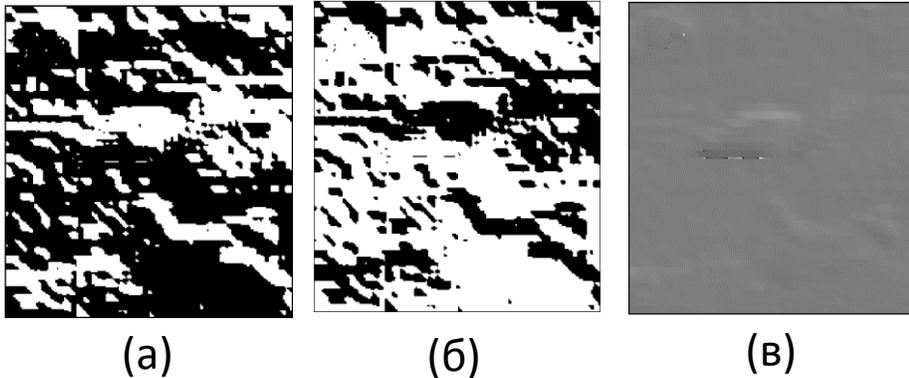
Характеристики освещённости: 1) $a(h)$; 2) $H(\tau)$; 3) $A(\tau)$
 $a = \sin A$, $h = \sin H$, A и B – азимут и высота Солнца, τ – время суток.

Изменения показаны для критических моментов сезонного времени: $t_1 = 174$ – день летнего солнцестояния (22 июня), $t_2 = 357$ – день зимнего солнцестояния (22 декабря).

$\varphi = 55^\circ 36' 42.63'' \text{C}$, $\lambda = 37^\circ 25' 48.49'' \text{B}$ – географические координаты геометрического центра свалки

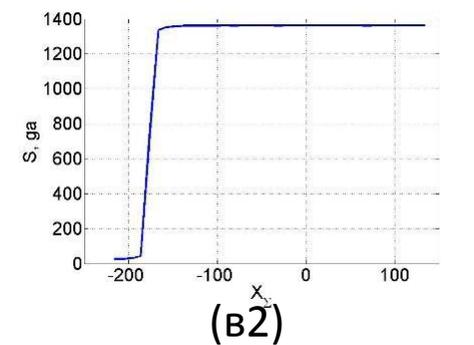
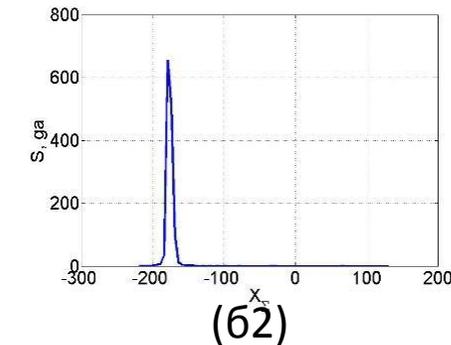
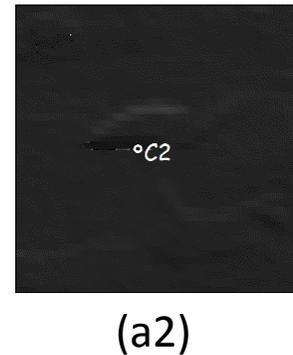
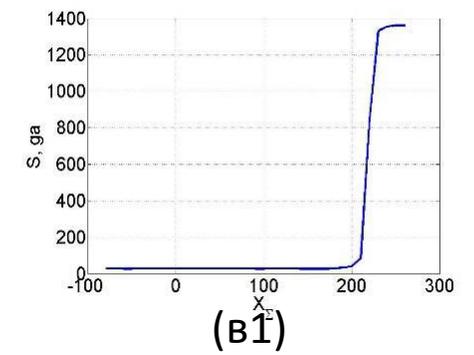
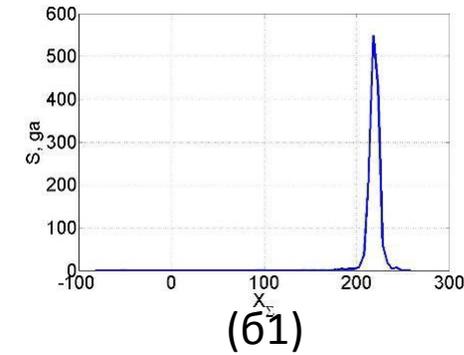
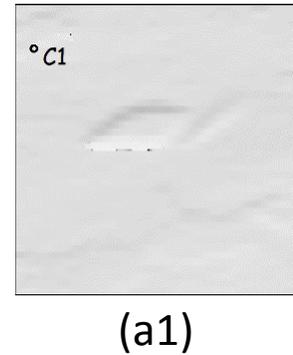


Интегральные индексы освещённости



Выделение освещённых (а) и затенённых (б) участков;
общее изображение освещённости (в) [t=174, τ=5]

C_1 – минимальное, наихудшее значение освещённости (устойчиво низкая плотность растительного покрова, основание свалки), C_2 – максимальное, наилучшее (высокая, лесомассив к северо-западу).



Визуальная
оценка,
2016, Google
Earth



C_1



C_2

Интегральные характеристики освещённости

Интегральные изображения освещённости (а); гистограммы: распределения (б), кумулятивные (в). (1) – светлое время суток, летний период (τ=11-15 ч, t=150-240 дн), (2) – тёмное время суток, зимний период (τ=0-3 ч, t=335-60 дн) [для Московского региона]

Оценка индекса реакции растительности и почвы на освещённость



ИРР, t_1



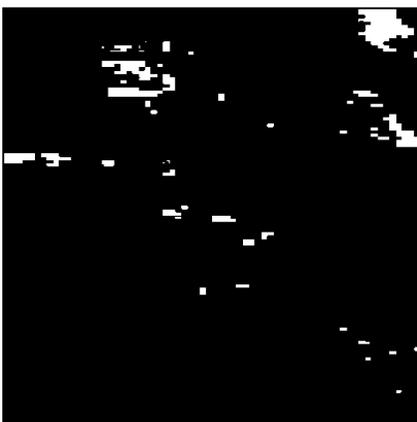
ИРР, t_2



ИРП

t_1 – 2001 г., 212 день, ~8.00 утра
Снимок:
ID – LT51780212001212MTI00

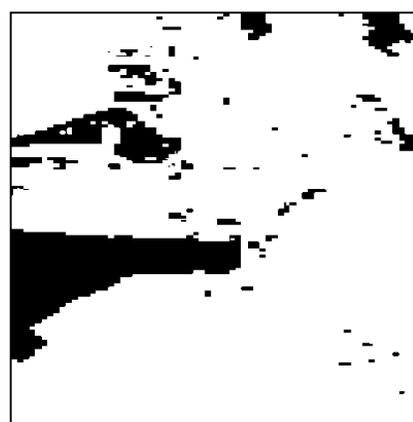
t_2 – 2003 г., 209 день, ~8.00 утра
Снимок:
ID – LT51790212003209MTI01



ИРР ≥ 0.1



ИРР ≤ -0.1

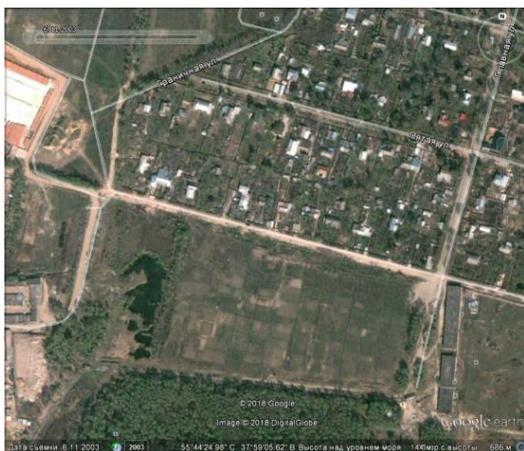


$|\text{ИРР}| < 0.1$

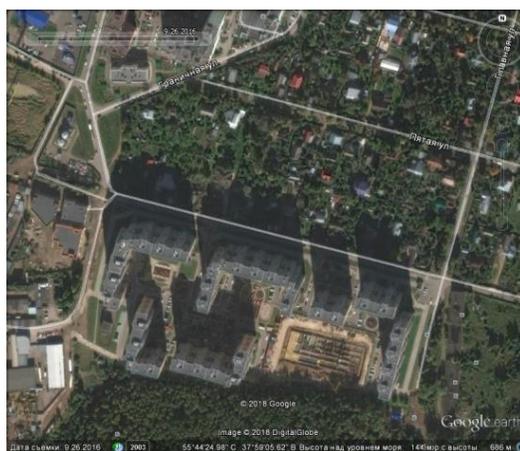
Реакция растительности на высотной свалке искажается, прежде всего, за счёт неровности (отклонения от абсолютно ровного «состояния») поверхности, которая влияет на освещённость. Со временем реакция изменилась структурно (лесомассивы, дороги, откос свалки и др.).

Оценка освещённости в окрестности застройки

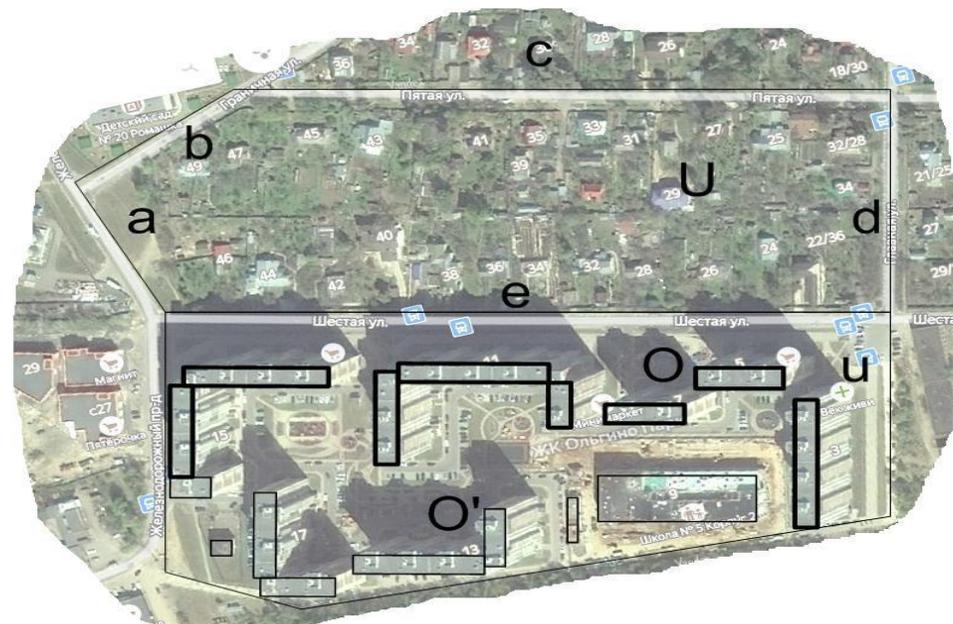
Область наблюдения



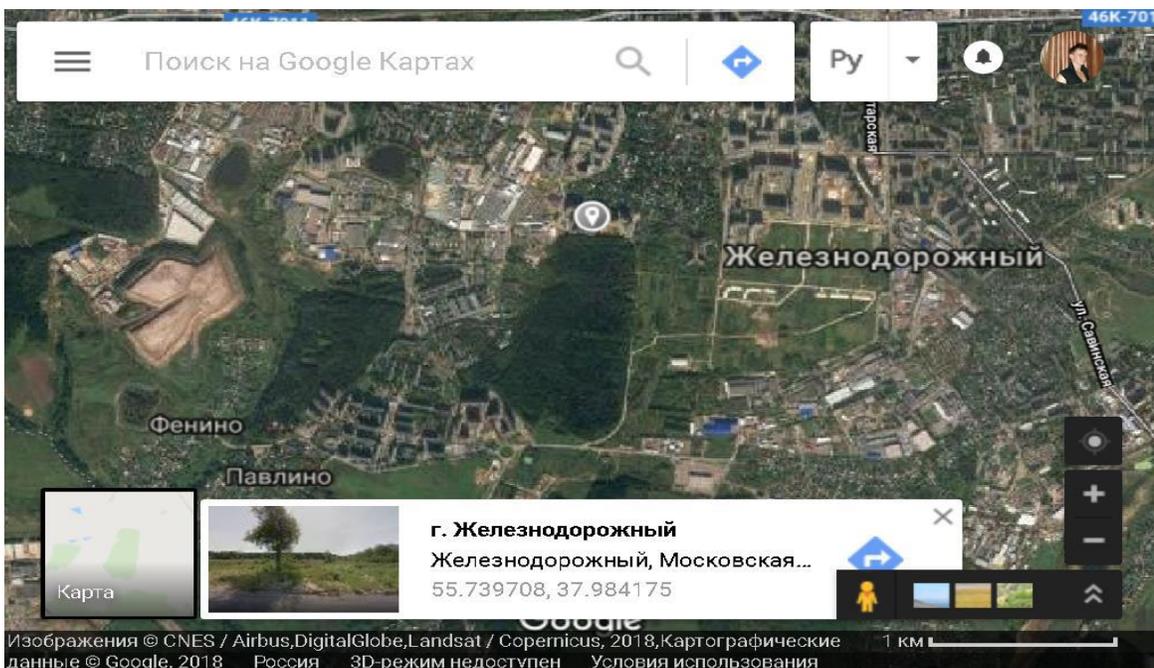
июнь 2003 г. (t_1)



сентябрь 2016 г. (t_2)



Разметка элементов сцены, изображение повернуто относительно utm (г. Железнодорожный, Шестая ул., $55^{\circ}44'25''\text{C}$, $37^{\circ}59'05''\text{B}$, карты Google)



Положение области наблюдения на карте

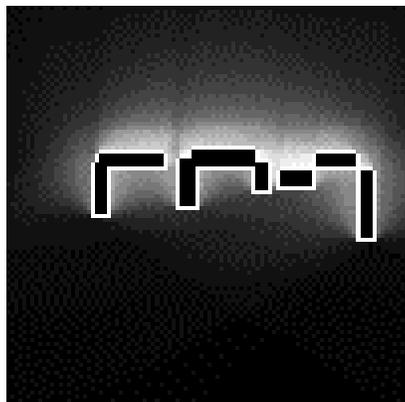
u – источник воздействия (высокоэтажная застройка)
 U – объект воздействия (квартал, низкоэтажная застройка)
 $\{a,b,c,d,e\}$ - дороги, ограничивающие область U
 источником воздействия), с момента t_1 – 2003 г. до момента t_2 – 2016 г. возникновения комплекса .
 O (O') – объекты в области u , формирующие (не формирующие) тень в области U . Модели O и O' – коробки $R=\{x_i, y_i, z\}$, $i=1..4$ одинаковой высоты $z=51$ м, (x_i, y_i) – вершины основания

Изменение тени во времени



Фрагмент бинарного видеоизображения изменения тени
Формат файлов – “t τ”, t – день года, τ – время суток

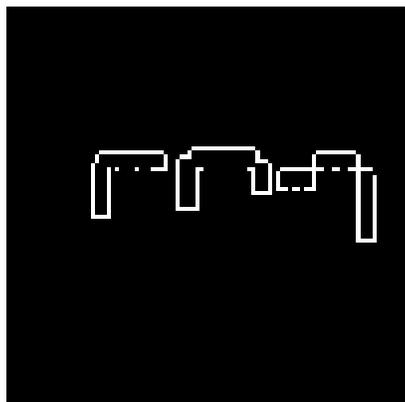
Интегральные индексы тени



Матрица индекса тени



Выделение источника
воздействия u

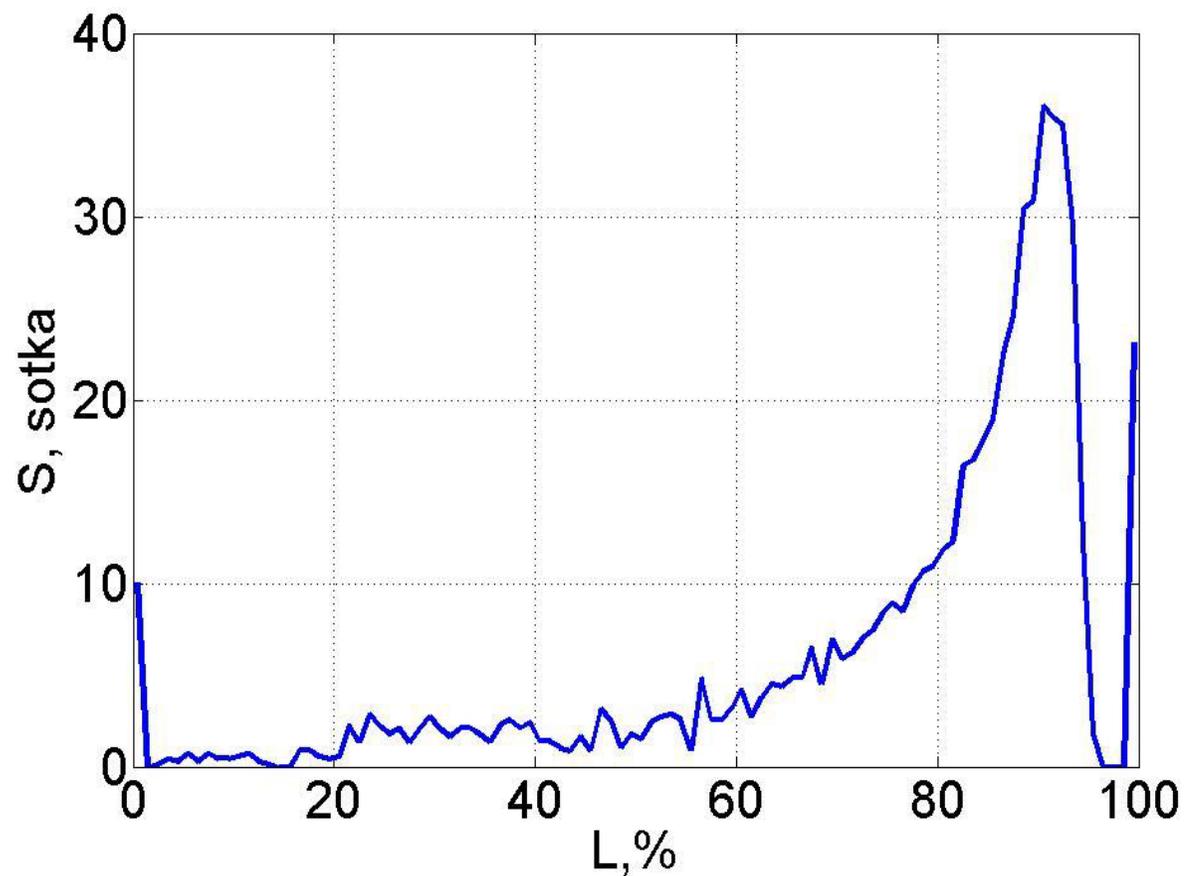


Область u_1
максимальной тени



Область u_2
минимальной тени

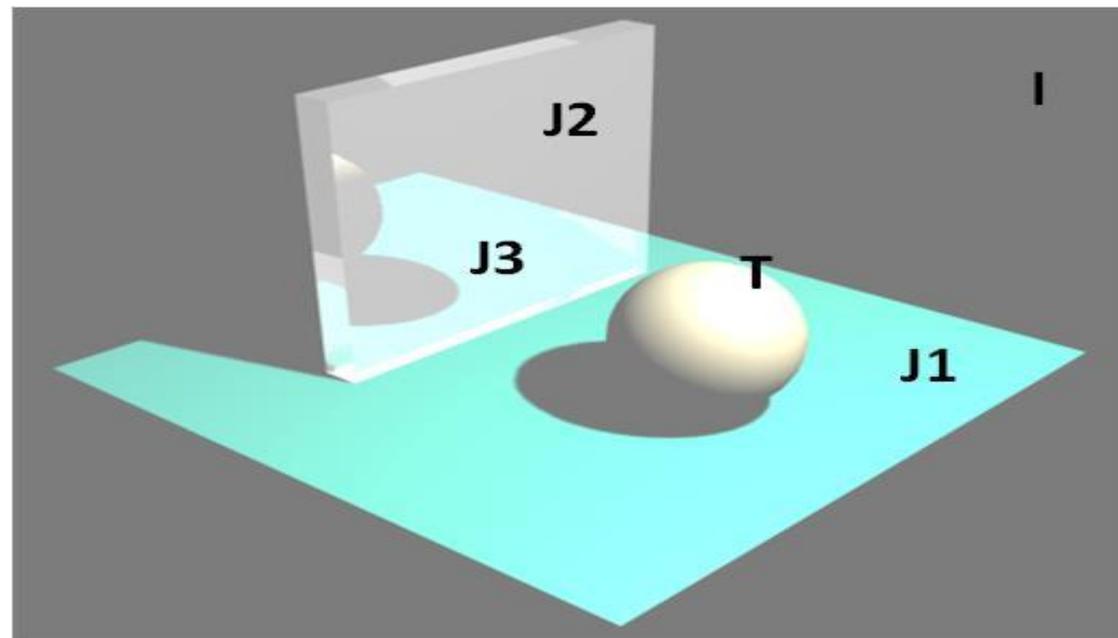
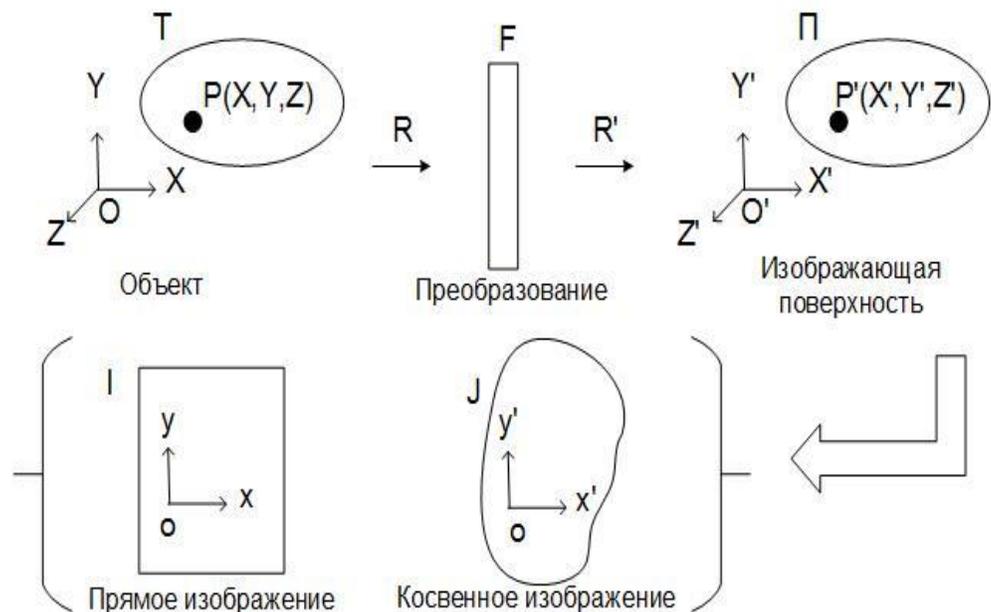
Расчёты индекса тени



Зависимость площади S поверхности земли от потери L освещённости в области воздействия U

**Методика построения
трёхмерных моделей
ригидных объектов по
косвенным изображениям**

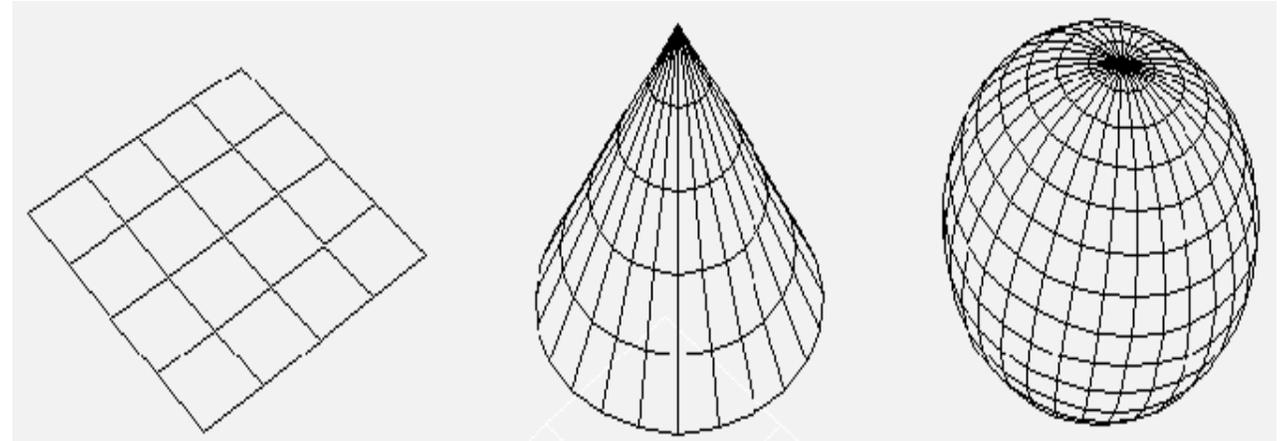
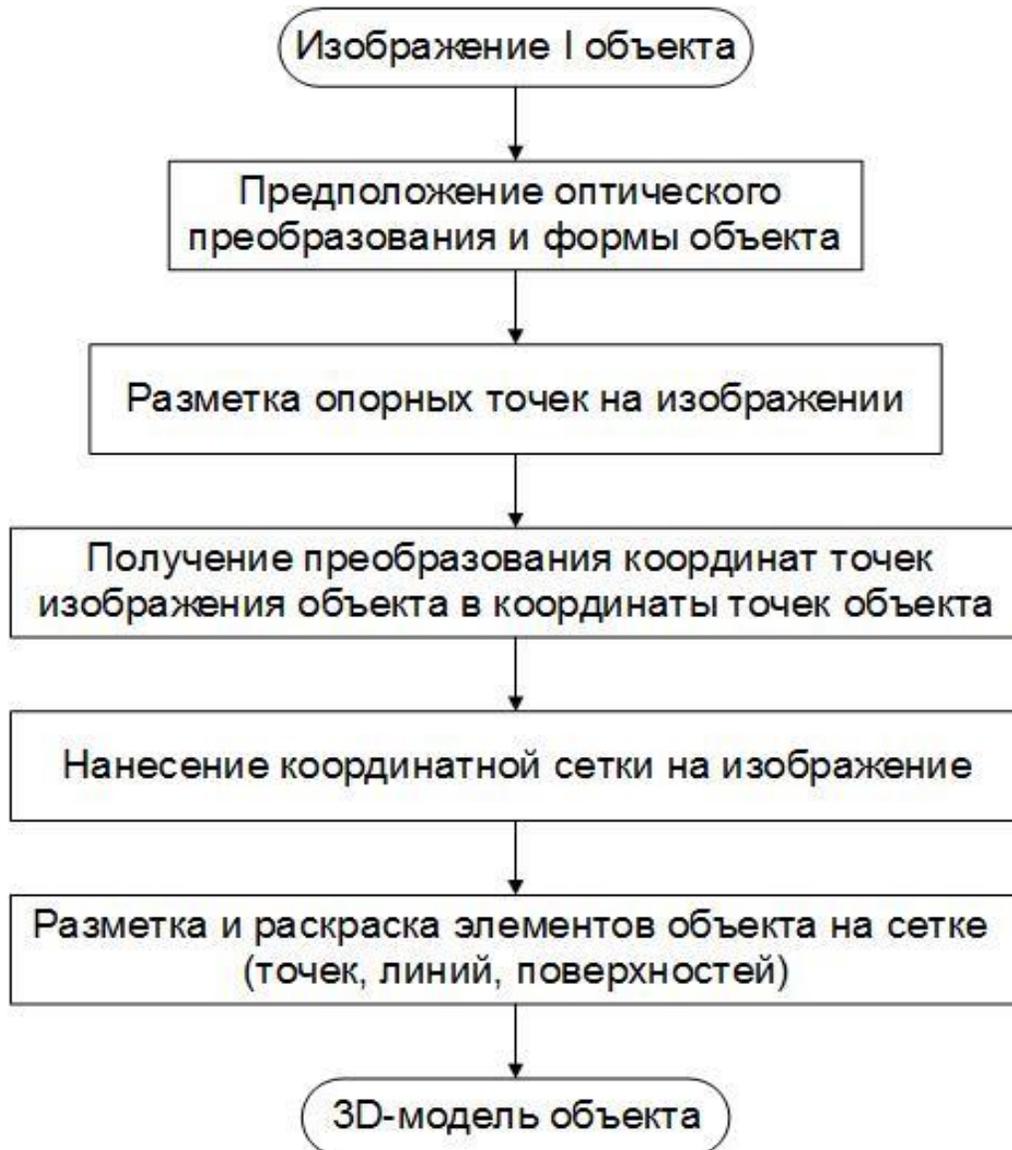
Прямые и косвенные изображения



Съёмка изображающей поверхности с некоторой камеры C даёт прямое изображение I , J – изображение, формируемое на этой поверхности. $OXYZ$ – СК объекта T и изображающей поверхности Π , oxy – СК изображения I , $o'x'y'$ – СК изображения J . F – передаточная функция оптических преобразований, дающая преобразование координат точек объекта из P с координатами R в СК $OXYZ$ в P' с координатами R' в СК $O'X'Y'Z'$.

Пример оптических преобразований, выполненных в программе 3ds-max. T – объект (шар), I – прямое изображение (съёмка с камеры C), J – варианты косвенных изображений ($J1$ – тень объекта, $J2$ – отражение объекта, $J3$ – отражение тени объекта)

Общая схема методики

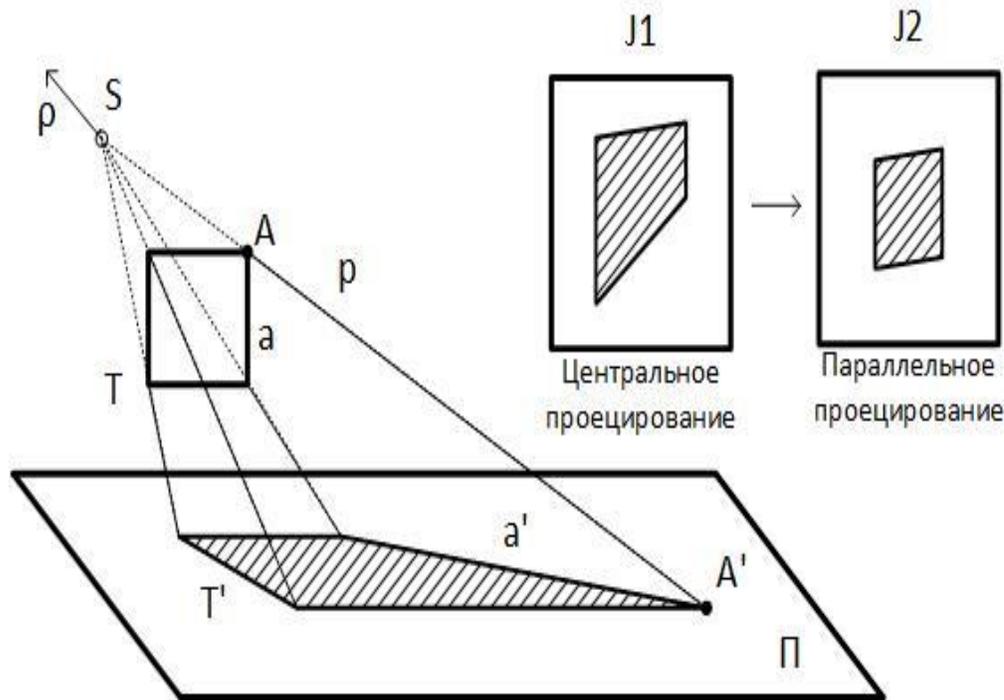


Примеры координатных сеток, наносимых на прямые или косвенные изображения

Оптические преобразования: образование тени, отражение, преломление, трансляция, оптическое увеличение или уменьшение, aberrации света и др.

$$X = F_x(Z, R'), Y = F_y(Z, R')$$

Оптическое преобразование изображений тени



Формирование изображений тени

Тень – след от предмета, оставленный на поверхности при подведении источника светового излучения. Сцена состоит из объекта O , изображающей поверхности F и источника S , отнесённого на расстояние ρ от точки A объекта O . Точка A даёт след A' на поверхности F . Изображение J тени бинарное (считаем область фигуры T тени имеет яркость 1, фон – 0).

При конечном значении ρ (для искусственных источников освещения) тень формируется как центральная проекция. В этом случае F имеет вид (по правилам центрального проецирования):

$$p: \frac{X - X'}{Z - Z'} = \frac{X - \alpha}{Z - \gamma}, \frac{Y - Y'}{Z - Z'} = \frac{Y - \beta}{Z - \gamma} \quad (1)$$

p – проецирующая прямая из источника S , дающая проекцию A' точки A на зеркальной поверхности Π , (α, β, γ) – координаты точки S в СК $OXYZ$.

При $\rho \rightarrow \infty$ (для естественных источников, как Солнце (первичный) или Луна (вторичный)). В этом случае F имеет вид (по правилам параллельного проецирования):

$$p: \frac{X - X'}{\alpha} = \frac{Y - Y'}{\beta} = \frac{Z - Z'}{\gamma} \quad (2)$$

p – проецирующие прямые из точек A в точки A' поверхности Π , α, β, γ – параметры прямых.

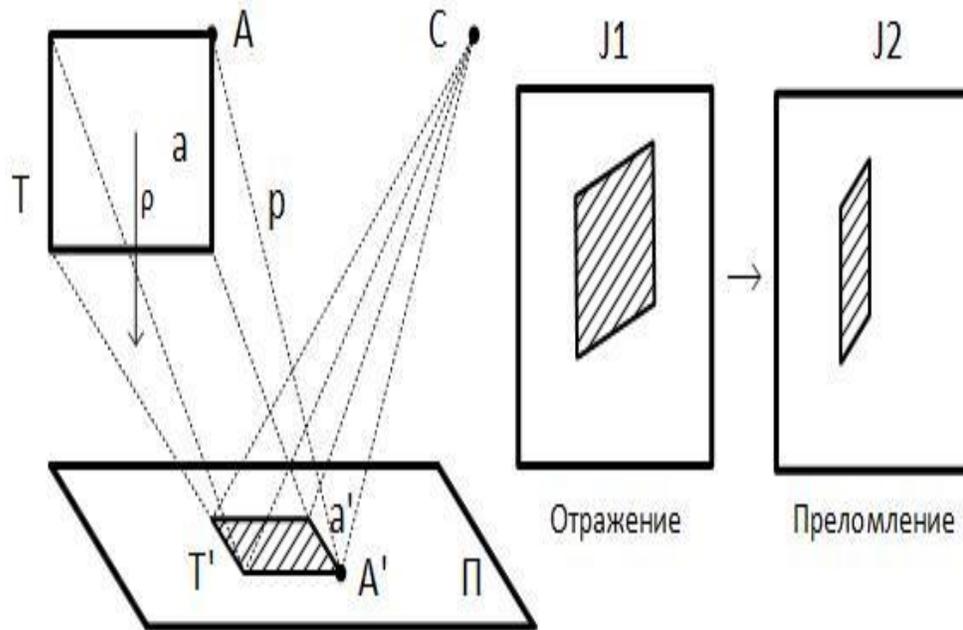
Оптические преобразования изображений отражения и преломления

По векторному закону зеркального отражения света F имеет вид

$$\omega: \bar{v}_2 = \bar{v}_1 - 2(\bar{v}_1 \cdot \bar{n})\bar{n}$$

$$\bar{v}_1 = \bar{V}_1/V_1, \bar{v}_2 = \bar{V}_2/V_2, \bar{n} = \bar{N}/N, G' = g'(X', Y') - Z'$$

$$\bar{V}_1 = [X' - X \quad Y' - Y \quad Z' - Z], \bar{V}_2 = [X' - \alpha \quad Y' - \beta \quad Z' - \gamma], \bar{N} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G'}{\partial X'} & \frac{\partial G'}{\partial Y'} & \frac{\partial G'}{\partial Z'} \end{bmatrix}$$



Формирование изображений отражения и преломления

ω – проецирующая плоскость из камеры C , дающая точку A' на поверхности F , (α, β, γ) – координаты точки C в СК $OXYZ$.

По векторному закону преломления света:

$$\omega: \eta \bar{v}_2 = \bar{v}_1 + \left(\sqrt{\frac{\eta^2 - 1}{(\bar{v}_1 \cdot \bar{n})^2} + 1} - 1 \right) (\bar{v}_1 \cdot \bar{n})\bar{n}$$

η – относительный показатель преломления, $\eta = \varphi_2 / \varphi_1$, где φ_1, φ_2 – показатели преломления среды поступающего и преломлённого излучения, Π – граница раздела двух сред (при $\eta=1$ преобразование преломления вырождается в преобразование отражения).

Восстановление 3D-модели объекта по изображениям тени

Изображение I, рендер

Изображение J, рендер

Разметка объектов и теней

Размеры объектов

Разметка точек

Скриншот модели

V1 – Вид сверху, V2 – Вид спереди, V3 – Вид слева, V – перспектива

- Точки, видимые на изображениях теней (и объектов)
- Точки, невидимые на изображениях теней (объектов), но восстанавливаемые геометрическими построениями

Восстановим 3D-модели двух ригидных объектов T^q , $q=1..2$ (коробки) по «стереопаре» их теней, заданных в СК $o'x'y'$. Считаем поверхность Π плоской, плоскость XY совпадает с плоскостью $X'Y'$, т.е. для любых точек, размечаемых на изображении J , $Z'=0$. Тени падают на одну поверхность Π от двух источников S_1 и S_2 . T_1^1 и T_1^2 – тени объектов T^1 и T^2 от источника S_1 , T_2^1 и T_2^2 – тени объектов T^1 и T^2 от источника S_2 . T^1 лежит на плоскости Π , T^2 висит в воздухе.

При формировании тени в общем случае имеется k опорных точек, заданных на m поверхностях, на которые падают тени от n_1 бесконечно удалённых источников и n_2 источников, удалённых на конечное расстояние. Всего $N_1=2mk(n_1+n_2)$ уравнений вида (1) и (2), $N_2=2mn_1+3mn_2$ переменных, описывающих преобразование объекта. Критерий расчёта параметров преобразования: $N_1 \geq N_2$. В нашем случае: $n_1=2$, $n_2=0$, $m=1$, отсюда для определения параметров преобразования необходимо $k=1$ опорная точка.

Опорные точки и результаты восстановления 3D-модели

i	(x_1^{i1}, y_1^{i1})	(x_2^{i1}, y_2^{i1})	i	(x_2^{i2}, y_2^{i2})	(x_1^{i1}, y_1^{i1})
1	192 359	192 359	1	273 253	152 265
2	215 359	215 359	2	306 253	185 265
3	259 322	154 331	3	294 242	140 256
4	282 322	177 331	4	325 242	171 256
5	192 326	192 326	5	273 226	152 237
6	215 326	215 326	6	306 226	185 237
7	259 289	154 299	7	294 215	140 229
8	282 289	177 299	8	325 215	171 229

i	(X^{i1}, Y^{i1}, Z^{i1})	(X^{i2}, Y^{i2}, Z^{i2})
1	105.6000 197.4500 0	107.6848 162.6010 60.0333
2	118.2500 197.4500 0	125.8348 162.6010 60.0333
3	105.6000 197.4500 52.0950	107.6533 162.9467 76.4060
4	118.2500 197.4500 52.0950	124.7033 162.9467 76.4060
5	105.6000 179.3000 0	107.6848 147.7510 60.0333
6	118.2500 179.3000 0	125.8348 147.7510 60.0333
7	105.6000 179.3000 52.0950	107.6533 148.0967 76.4060
8	118.2500 179.3000 52.0950	124.7033 148.0967 76.4060

Оценка размеров объекта:

$$\tilde{l}_1 = |X^{81} - X^{71}| = 12.65\text{cm}$$

$$\tilde{w}_1 = |Y^{41} - Y^{51}| = 18.15\text{cm}$$

$$\tilde{h}_1 = |Z^{31} - Z^{21}| = 52.095\text{cm}$$

$$\tilde{l}_2 = |X^{82} - X^{72}| = 17.05\text{cm}$$

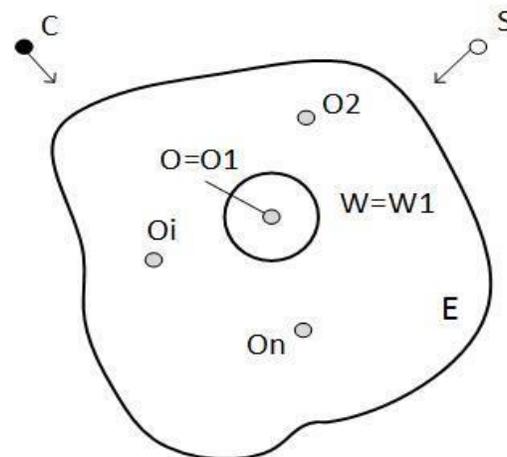
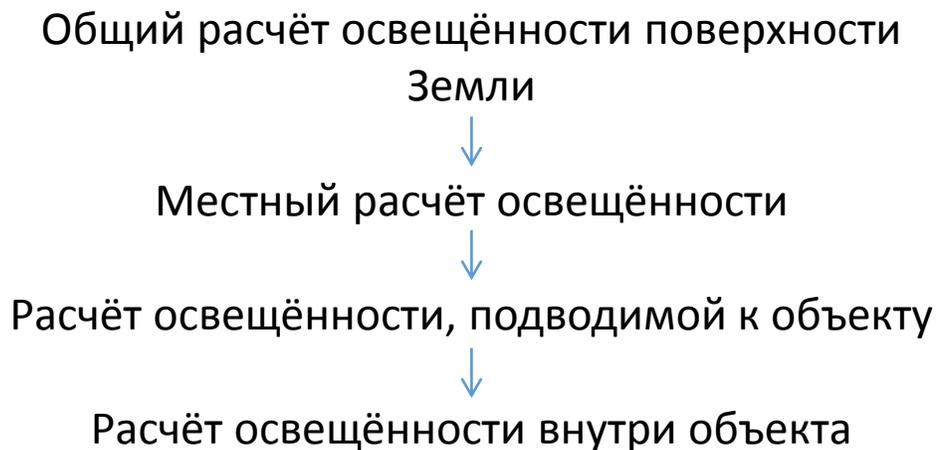
$$\tilde{w}_2 = |Y^{42} - Y^{52}| = 15.1957\text{cm}$$

$$\tilde{h}_2 = |Z^{32} - Z^{22}| = 16.3727\text{cm}$$

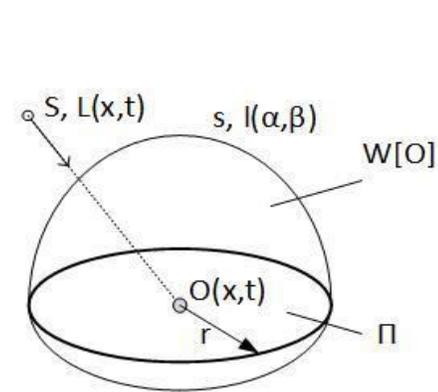
$$\tilde{l}_{12} \approx l_{12}, \tilde{w}_{12} \approx w_{12}, \tilde{h}_{12} \approx h_{12}$$

Методика пространственного моделирования и оценки освещённости объектов земной поверхности

Общая схема методики



Привязка источника к местности

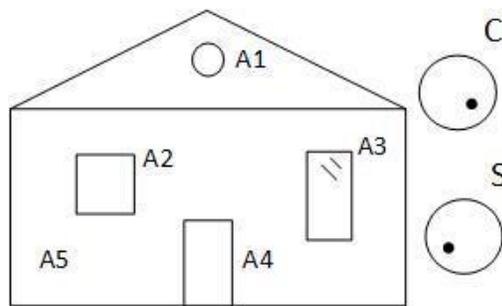


Привязка источника к объекту

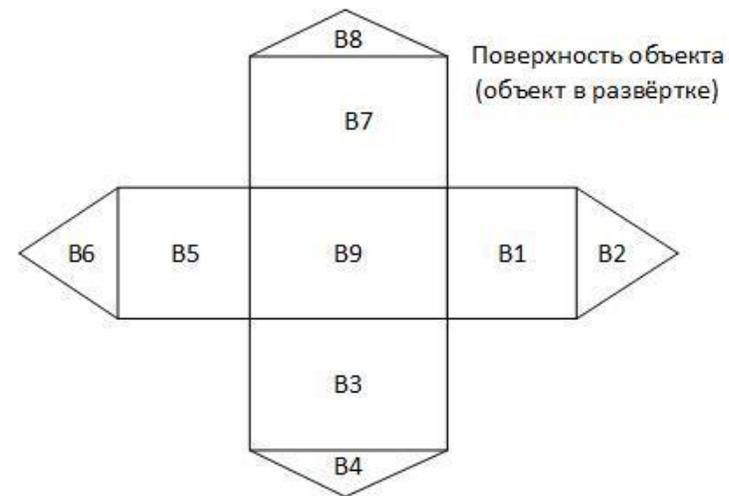
Привязка внешнего источника освещения к местности и ригидному объекту

Источники освещения: естественный и искусственный; дневной и ночной; точечный, линейный, полигональный, объёмный; направленный и фоновый; внутренний и внешний; первичный и вторичный и др.

Объекты освещения: нестандартными и стандартными; постоянными, переменными, случайными; видимые и невидимые и др.



Участки поверхности объекта R различной световой «проводимости»



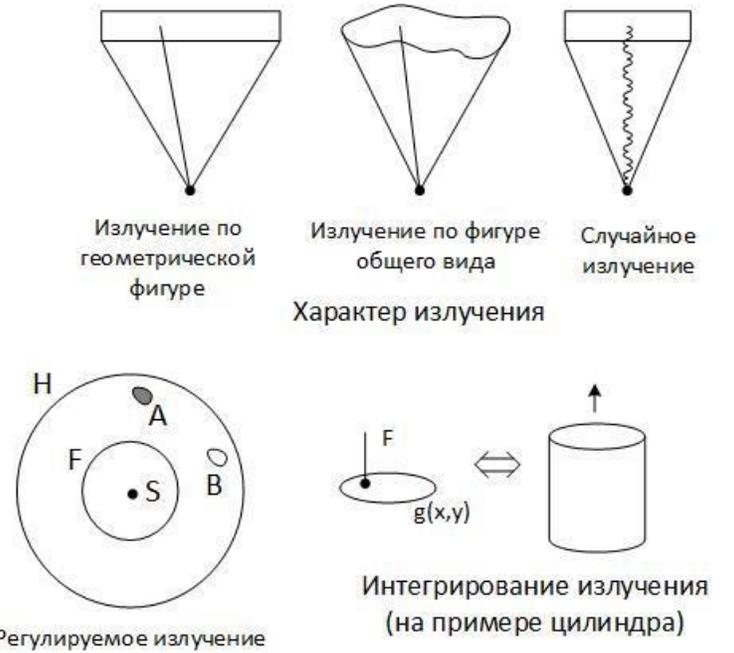
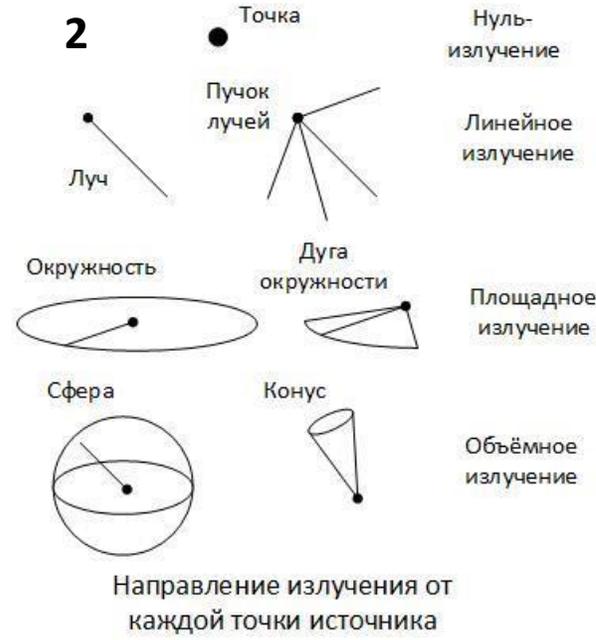
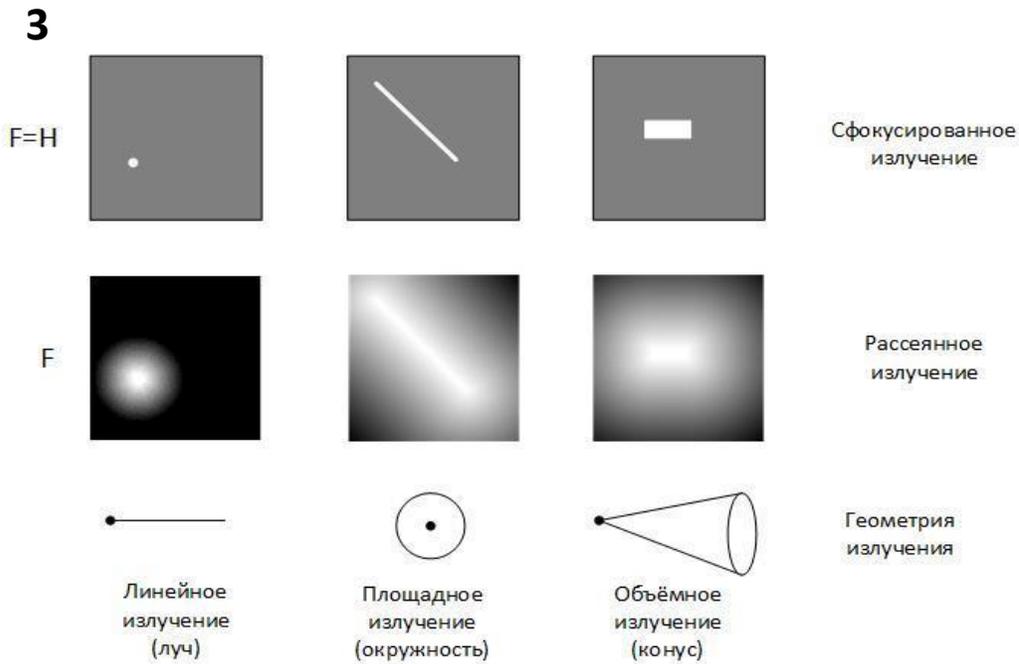
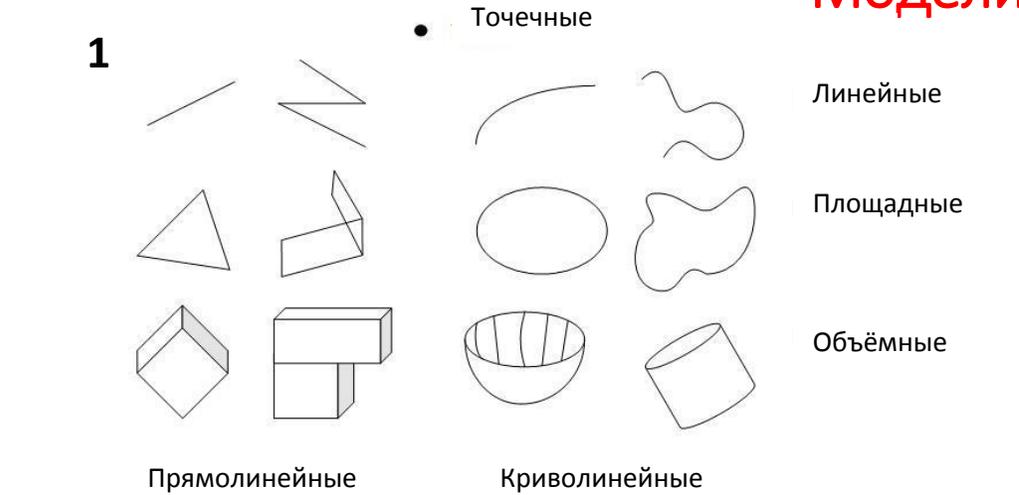
Поверхность объекта (объект в развёртке)

Участки поверхности объекта различного характера освещённости S и видимости C

Поверхность ригидного объекта (на примере простейшего здания)

Методика пространственного моделирования и оценки освещённости ригидных объектов:

Модели источников освещения



1 – геометрия источников освещения

2 – геометрия излучения источников освещения

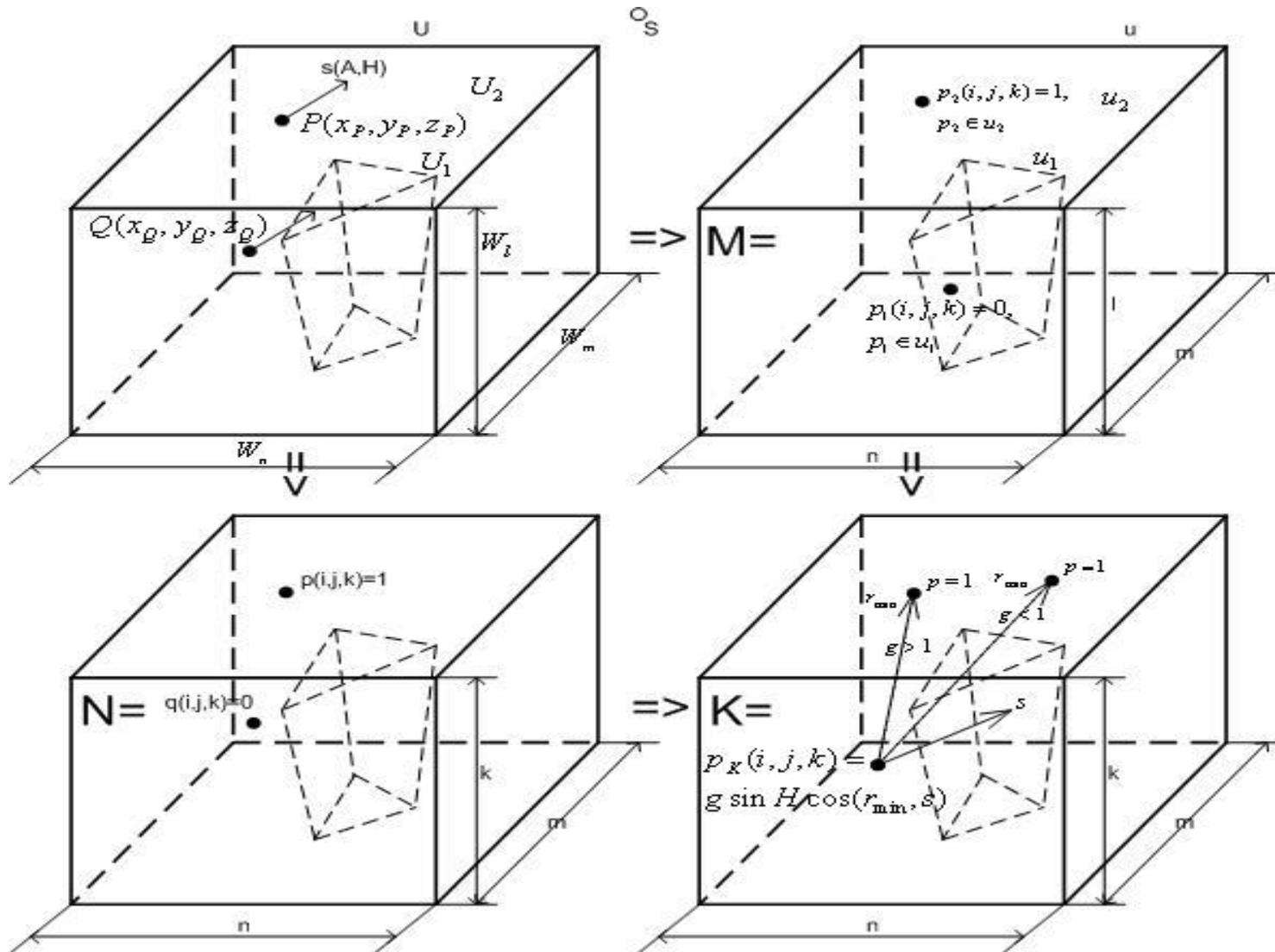
3 – матрицы излучения (на примере луча, окружности и конуса)

$$f(i, j) = \frac{1}{F_m} F(\alpha, \beta), \quad F_m = \max F, \quad i = \left[\frac{m(\alpha + \pi)}{2\pi} \right], \quad j = \left[\frac{n(\beta + \pi)}{2\pi} \right], \quad \alpha, \beta \in [-\pi, \pi]$$

F – матрица излучения, задающая интенсивность излучения от точки p в направлении (α, β) в СК $ox_1x_2x_3$, f – изображение визуализации (i – номер строки, j – номер столбца); F_m – максимальное значение интенсивности, $m \times n$ – размер матрицы, дающая точность модели излучения.

Направление задаётся углами α – долгота, отсчитываемая от оси x_1 , β – широта, отсчитываемая от плоскости x_1x_2 , в СК $ox_1x_2x_3$.

Трёхмерные изображения освещённости



U – “прямоугольная” область наблюдения, (W_m, W_n, W_l) – размеры области U , U_1 – область «материи», экранирующей излучение объектов (здание), U_2 – область «антиматерии», пропускающей излучение объектов (воздушное пространство); u, u_1, u_2 – оцифрованные области, $\{m, n, l\}$ – размеры области u .

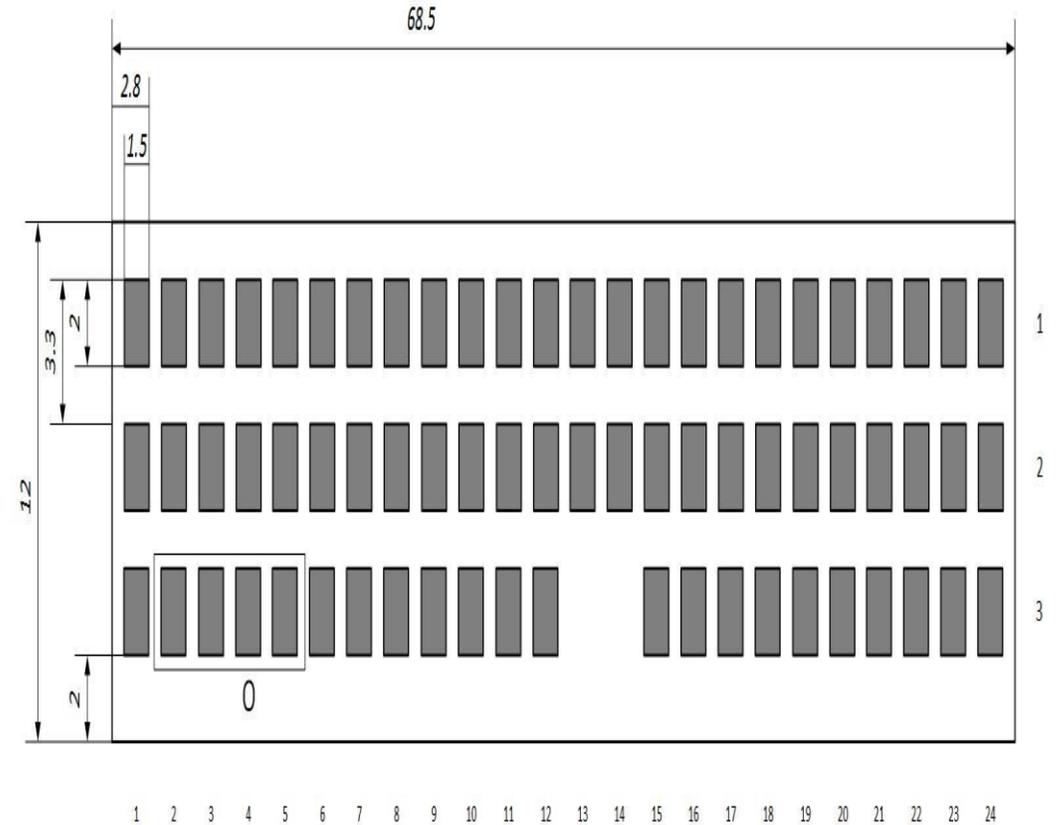
A и H – азимут и высота источника освещения (Солнце), (m, n, l) – размеры матриц M, N, K ; M – бинарная матрица «материи» и «антиматерии», N – бинарная матрица затенённых и освещённых областей, K – полутоновая матрица интенсивности освещения ($p_K > 0$ – точка освещена, $p_K < 0$ – точка в тени)

Проектно-исследовательская
работа Дементьева И.А. (11
класс, ГБОУ СОШ г. Москвы № 97,
программа 3Ds-max, ноябрь-
декабрь, 2017 г.)

Моделирование освещённости на примере помещения здания



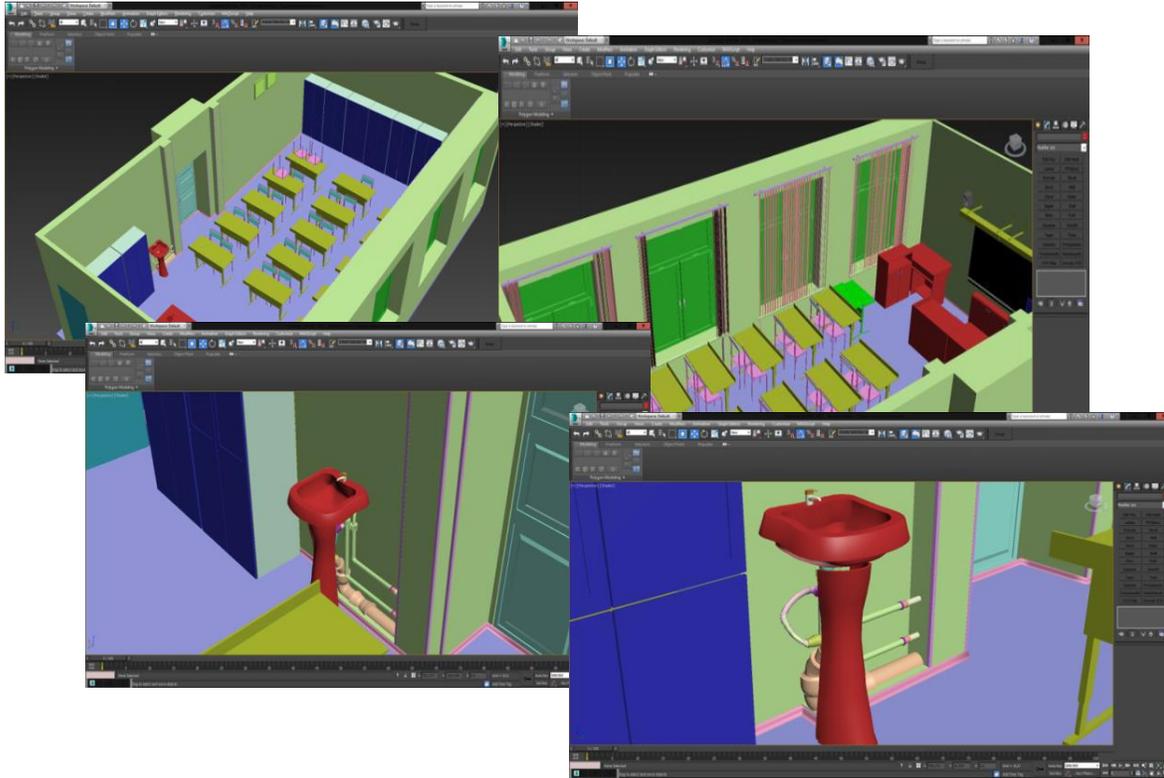
Космическое изображение



Модель (матрица окон)

*Пример здания, снятого с определённого ракурса С
(ГБОУ СОШ г. Москвы № 97)*

3D-модель помещения здания и его освещения



Скриншоты 3D-модели ригидного объекта (общий вид модели)

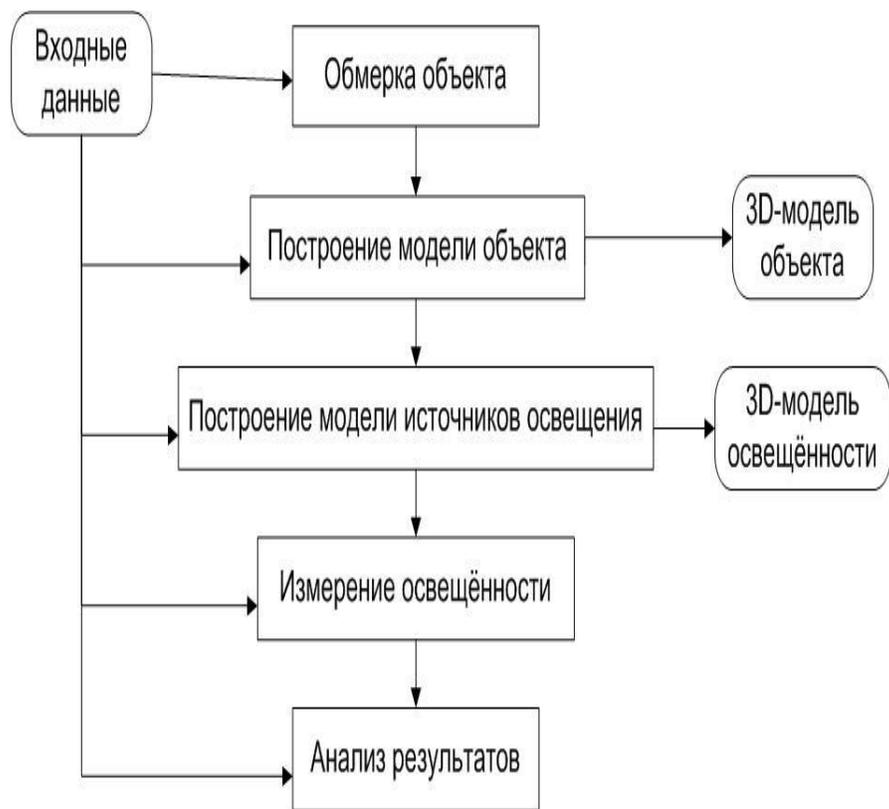


Рендер 3D-модели объекта с камеры S' и разметка расчётных точек P_i

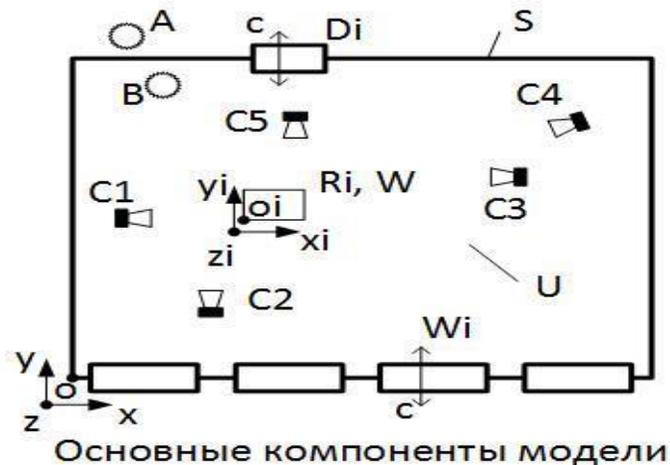
Измерение освещённости 3D-модели

Оценка освещённости выполнена в характерных точках $\{P_i\}$: P_1 – на подоконнике наиболее освещённого окна, P_2 – между тумбой и столом на углу в основании помещения, P_3 – на углу наиболее удалённой школьной парты. $Ox_1x_2x_3$ – местная СК, привязанная к объекту (координаты – в метрах): правая СК: o – в углу помещения в основании, x_1 – параллельно освещённой стене (с окнами) помещения, x_2 – параллельно «глухой» стенке помещения, x_3 – по углу помещения. По расчётам в пространственной области U помещения освещённость меняется в диапазоне от 0 до ~ 750 Лк, в точке P_1 , координаты $\sim (650, 0, 70)$ – максимальное значение освещённости ~ 750 Лк, в точке P_2 , координаты $\sim (240, 680, 70)$ – среднее значение освещённости ~ 250 Лк, в точке P_3 , координаты $\sim (60, 0, 0)$ – минимальное значение освещённости ~ 0 Лк. В областях v поверхностей школьных парт освещённость лежит в диапазоне $\sim (250-600)$ Лк, что соответствует нормам СНиП. Подоконники засвечены, а парты, прилегающие к окнам, имеют избыточное значение освещённости. Благоприятное значение в соответствии со стандартами СНиП для рабочих и учебных помещений составляет $\sim (200-500)$ Лк.

Пространственное моделирование реальных сцен и освещённости в программе 3ds-max в проектной деятельности школьников



Общая схема исполнения проектной работы по 3D-моделированию освещённости ригидного объекта



Общая схема модели

Помещение имеет определённый спектр $k(q)$ внутренних объектов, всего ~50 классов и ~1000 объектов

Моделирование текстур поверхностей



(a1)



(a2)



(a3)



(a4)



(b1)



(b2)



(b3)



(b4)

Примеры фотографий (а) и выделенных на базе них текстур поверхностей (б), накладываемых на объекты: 1) «дерево», 2) «линолеум», 3) «кафель», 4) «жалюзи»

Точность визуализации



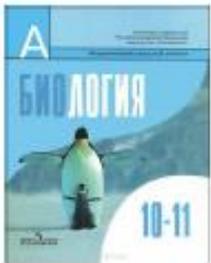
(a)



(a)



(б)



(1)



(2)



(3)



(4)

Точность визуализации модели освещённости: а) фотография ($\sim C_5$), б) рендер (C_5)

Точность визуализации модели области наблюдения: а) модель помещения (рендер, камера C_1); б) фотографии внутренних объектов (на примере текстуры «бумаги»)

Снимки модели заданного режима с разных камер



(a)



(б)



(в)

Снимки 3D-модели помещения для установленного режима источника В с камер: а) C_1 ; б) C_2 ; в) C_3

Снимки модели при различных режимах освещения



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

С камеры C_4 , источники B

Снимки модели при подключении и отключении источников освещения



(a1)



(a2)



(a3)



(б1)



(б2)



(б3)

Снимки 3D-модели помещения при подключении (а) и отключении (б) источника освещения с камер: 1) C_4 ; 2) C_1 ; 3) C_2 (источник В)

Снимки модели при подключении и отключении внутреннего и внешнего источника освещения



(a1)



(a2)



(б1)



(б2)

Снимки 3D-модели помещения: при подключении *B* и отключении *A*, б) при отключении *B* и подключении *A*; 1) с камеры C_1 , 2) с камеры C_5

Выводы

- С точки зрения цифровой обработки освещённость представляется 2D-индексом (индекс подстилающей поверхности) или 3D-индексом (в каждой точке трёхмерного пространства), изменяемый во времени. В этой связи освещённость рассматривается в общем как пространственный параметр, для которого решается одна из прикладных задач цифровой обработки трёхмерных изображений (растровых и векторных).
- Предложен ряд методик моделирования освещённости, в частности: оценка реакции растительности и её изменения во времени на плотность светового потока; построение 3D-моделей ригидных объектов с помощью координатных сеток по косвенным изображениям; моделирование излучения, источников и объектов освещения в области наблюдения с применением методов космического мониторинга и программных средств по 3D-моделированию (Sketch Up, 3Ds-max и др.); оценка освещённости и её распределения внутри полых объектов (зданий, сооружений) по данным их трёхмерных моделей.
- Методики были применены в ряде задач, в частности, при оценке индекса реакции растительности на освещённость в окрестности крупных свалок, при оценке освещённости внутри помещений зданий при заданной подведённой естественной и искусственной освещённости, при оценке изменения освещённости, вызванной застройкой территории.