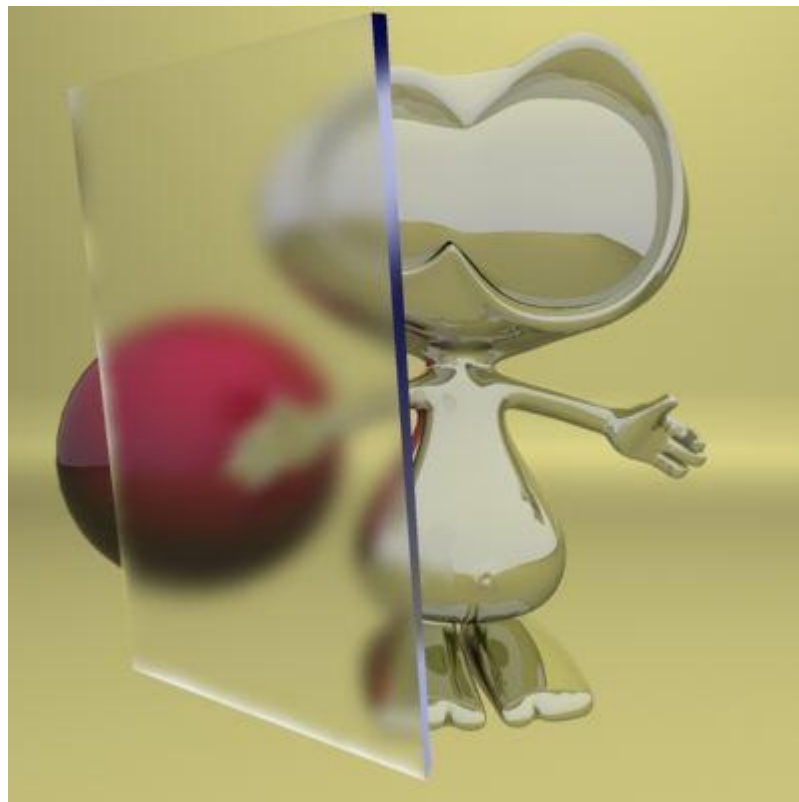
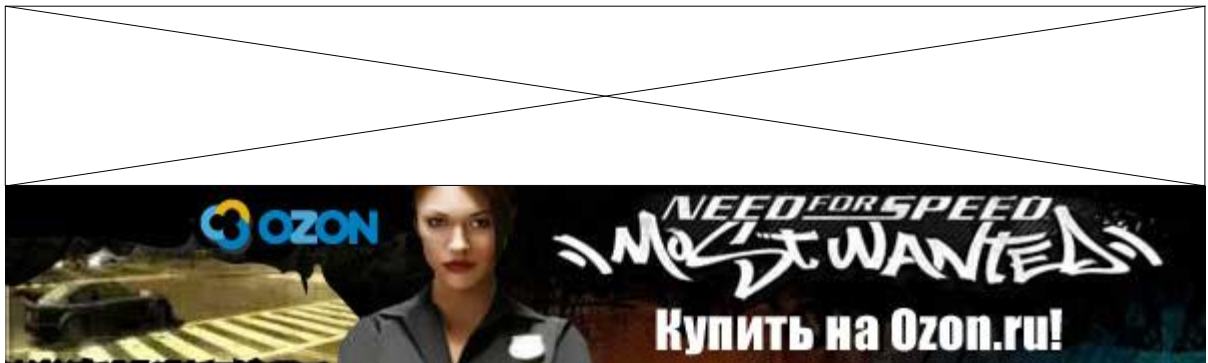


VRay - что это такое и как этим пользоваться: Часть 1



Введение

Среди современных рендер-программ для **3ds max** **VRay** пользуется наибольшей популярностью. Нисколько не преувеличивая можно сказать, что **VRay** популярен настолько, насколько все остальные рендеры - **mental ray**, **finalRender** и **brasil r/s** вместе взятые. Этот факт тем более удивителен и замечателен, что алгоритм и ядро программы разрабатывались всего несколькими людьми.

Популярность этой программы имеет самые веские причины. Во-первых, **VRay** использует в расчетах передовые вычислительные методы - он построен исключительно и полностью на основе метода Монте-Карло. В этом отношении, пожалуй, **VRay** можно использовать в качестве демонстрационной программы для метода Монте-Карло. Но кроме этого, **VRay** обладает целым рядом интересных инновационных технологических решений, обеспечивающих ему дополнительное

преимущество в качестве и скорости расчетов. Данная статья преследует своей целью рассказать об основных внутренних механизмах расчетов **VRay** и предложить некоторые методы их эффективного использования.

Основные принципы

Основной задачей любой программы рендеринга является вычисление освещенности и цвета произвольной точки трехмерной сцены. Задача эта очень непроста. Вычислительные методы компьютерной графики проделали довольно длинный путь эволюционного развития, прежде чем достигли современного уровня фотореалистичности синтезированных на компьютере изображений.

Первое, что научились считать - это освещенность объектов от источников света, находящихся в прямой видимости, когда объект и источник можно соединить прямой линией. Венцом этой модели расчетов стала модель освещения Фонга и модель затенения Фонга, которые позволили выполнять сглаживание цвета полигонов поверхности и вычислять зеркальные подсветки для нее. Эта модель освещения, а также ее модификации (**Ламберт**, **Блинн**, **Торрент**, **Ward** и другие) и сейчас являются основой для расчета прямой освещенности, правда, с некоторыми дополнениями. Одно из важнейших уточнений - учет пространственных размеров источника света, позволяет получать мягкие края у теней объектов. Другое дополнение относится к определению затухания интенсивности света с расстоянием. В частности, в физически корректных расчетах освещенности используется закон квадратичного затухания интенсивности распространяющегося луча света от расстояния.

Вторая компонента освещенности объектов определяется зеркальным (или близким к зеркальному) отражением от окружения и прозрачностью самого объекта. Для ее вычисления был разработан метод трассировки лучей - **ray tracing method**. Этот метод отслеживает траектории лучей света, начиная от камеры, до первой поверхности пересечения и затем - в зависимости от прозрачности или отражающих свойств поверхности, определяется направление дальнейшего распространения луча. Метод трассировки лучей от камеры впервые позволил учесть в расчетах освещенности объекта его окружение и был более эффективен, чем отслеживание лучей от источников света, поскольку обрабатывал только достигающие камеру лучи. Одним из недостатков классического метода трассировки лучей является «жесткость» получаемого изображения - излишняя четкость контуров, теней, цветов. Поэтому в дальнейшем была разработана модификация, известная как **distribution ray tracing (DRT)**. Суть **DRT** в том, что при каждом пересечении трассируемого луча с поверхностями вдоль его траектории, из каждой точки пересечения строится не один, а несколько лучей. Этот процесс несколько напоминает цепную реакцию. Такой подход позволил рассчитывать размытые отражения и преломления (известные также как **fuzzy**, **blurry** или **glossy** отражения и преломления), но за счет огромного увеличения объема расчетов. Модель **DRT** реализована в свойствах отражений и преломлений материалов **VRay** при помощи параметра **Glossy**. Из-за высокой стоимости расчетов **DRT**, медленность расчета **glossy**-материалов **VRay** стала «притчей во языцех».

Третья компонента освещенности объекта рассчитывает многократные диффузные переотражения света окружающими объектами. Самым первым способом расчета вторичной диффузной освещенности был **radiosity**, который, хотя и используется до сих пор, в силу ряда присущих ему недостатков уступил место двум более прогрессивным алгоритмам расчета - методу Монте-Карло и методу фотонных карт. Метод фотонных карт создает для каждой поверхности объекта сцены базу данных, в которой хранится информация о столкновениях «фотонов» с поверхностью - координаты столкновения, направление и энергия фотона. Под фотоном понимается порция энергии освещения, распространяющейся в некотором направлении от данного источника света. Плотность фотонной карты используется в дальнейших расчетах для оценки освещенности точки в результате диффузного рассеяния света на поверхностях окружения. Все рендеры, использующие метод фотонных карт, выполняют расчет освещенности за два прохода.

На первом проходе выполняется трассировка фотонов от источников света до поверхностей, и создаются фотонные карты для них. На втором проходе выполняется обратная трассировка лучей от камеры, а фотонные карты используются для расчета диффузной освещенности точек пересечения лучей обратной трассировки с поверхностями.

Четвертая компонента освещенности занимается специальным случаем освещенности - рассчитывает световые эффекты, возникающие в результате фокусировки из-за преломлений или отражений лучей света в некоторой области поверхности. Эти эффекты получили название **caustic**-эффектов освещения, а прекрасным иллюстрирующим примером «из жизни» может служить линза, фокусирующая солнечный свет на поверхности объекта. Расчет **caustic**-эффектов освещения может быть выполнен методом фотонных карт, но при этом требуется локальная фотонная карта очень высокой плотности. Поэтому такие фотонные карты создаются отдельно при возникновении необходимости.

Подводя черту под вышесказанными, можно утверждать, что современный уровень развития вычислительных методов компьютерной графики позволяет рассчитывать освещенность произвольной точки трехмерной сцены как сумму четырех компонент: прямой освещенности, зеркальных преломлений и отражений, вторичных диффузных отражений и **caustic**-эффектов освещения.

Для совершенно точного расчета всего света, падающего на данную точку поверхности, требуется просуммировать лучи света, приходящие в нее со всех направлений. Это приводит к необходимости интегрирования освещенности по полусфере, окружающей точку, если она принадлежит непрозрачной поверхности, или - по сфере, если поверхность является еще и прозрачной. Для построения интегралов освещенности в компьютерной графике используются функции, описывающие все четыре компонента освещения - функции источников света, функции свойств зеркального (идеального) отражения/преломления поверхности и функции диффузного отражения поверхности. Последние два вида функций часто объединяют в одну, получившую название **BRDF - Bidirectional Reflectance/Refractance Distribution Function** (двунаправленная функция распределения отражения/преломления). Однако точное аналитическое решение таких интегралов в большинстве случаев невозможно, поэтому для их нахождения используются различные численные методы.

Один из основных методов - метод Монте-Карло. В самом общем смысле метод Монте-Карло позволяет вычислить значение интеграла как сумму небольшого количества значений подынтегральных функций, выбранных случайным образом. Фактически, весь математический аппарат метода Монте-Карло представляет собой правила определения выбора таких значений, поскольку от этого зависит точность и скорость нахождения решений интегралов. Выбранные для расчета интеграла значения подынтегральных функций часто называют сэмплами (**samples**). В настоящее время метод Монте-Карло является стандартом "де-факто" для рендеров трехмерной компьютерной графики и используется очень широко - практически во всех ведущих пакетах. Тем не менее, этот метод обладает серьезным недостатком - медленной сходимостью решений. На практике это означает, что для увеличения качества расчета освещенности, например, в два раза потребуется вчетверо увеличить объем вычислений (количество сэмплов). Недостаток качества проявляется в рендере как "шум" - видимые на изображении световые пятна, зернистость и визуальные артефакты.

Метод фотонных карт разработан как альтернатива расчета вторичной диффузной освещенности методом Монте-Карло и заменяет расчет соответствующего интеграла. Такой подход имеет ряд преимуществ и недостатков. Главные преимущества фотонных карт - скорость и корректность расчетов. Недостатки связаны с большими требованиями к памяти и трудностями в обработке стыков, углов и границ поверхностей. На практике, по крайней мере сейчас используется комбинация метода Монте-Карло и фотонных карт.

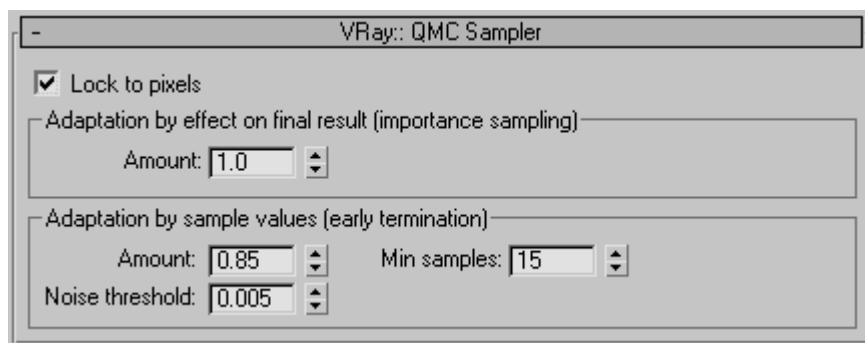
Программное ядро **VRay** построено исключительно на методе Монте-Карло. **VRay** использует также и метод фотонных карт, но не как альтернативу методу Монте-Карло, (что имеет место, например, в **mental ray**), а как дополнение. Говоря более точно, для первого диффузного переотражения (луч света от источника падает на поверхность, отражается и попадает в точку, освещенность которой рассчитывается) в **VRay** используется метод Монте-Карло. Для всех диффузных переотражений, начиная со второго (луч света дважды или более отражается от других поверхностей, прежде чем достигает расчетной точки), может использоваться как метод Монте-Карло, так и метод фотонных карт. В терминологии **VRay** первое диффузное отражение обозначается как **First diffuse bounces** - первый отскок, все остальные переотражения - **secondary bounces**, или вторичный отскок. Такой подход довольно рационален, поскольку известно, что основную часть диффузной освещенности точки формирует именно второе отражение. Вклад остальных отражений невелик вследствие очень быстрого затухания интенсивности диффузных отражений с увеличением их количества. Таким образом, предложенное в **VRay** сочетание метода Монте-Карло и фотонных карт обеспечивает точность и более высокую скорость расчетов, по сравнению с конкурирующими рендер-программами.

Использование фотонных карт для расчетов переотражений гораздо более предпочтительно, поскольку позволяет быстрее получать более качественный результат. Однако, из-за того, что фотонные карты не могут работать с источниками света типа **Skylight**, **HDRI** и ограничены размером доступной памяти, при расчете освещенности открытых сцен и в некоторых других специальных случаях вместо фотонных карт часто используют все же метод Монте-Карло.

Управляющие Параметры VRay

VRay: QMC Sampler

Группа параметров, управляющих в **VRay** общими свойствами метода Монте-Карло, расположена на закладке **QMC sampler** и выглядит следующим образом:



Значения параметров этой закладки определяют сколько и какие именно сэмплы будут использованы при вычислениях любых величин, использующих метод Монте-Карло. Напомню, что практически любая величина, рассчитываемая **VRay** - все виды освещенности, преломления и отражения, **translucency**, **caustic** и т. д., используют этот метод. В конечном итоге, от этих настроек зависит, как скорость расчетов, так и их точность, а, следовательно, - соотношение время/качество рендера изображения.

Lock to pixels используется для устранения миганий пикселей в анимации. Если установлена галочка в **checkbox** напротив этого параметра, при расчете изображения используется жесткая привязка значений рассчитываемых величин к пикселям изображения с тем, чтобы эти значения были одинаковы для одних и тех же пикселей разных соседних кадров. Метод Монте-Карло имеет случайную природу, поэтому и вычисляемые раз за разом с его помощью одни и те же величины могут немного отличаться друг от друга при прочих равных условиях. Если рассчитывается статическое

изображение, этот параметр можно смело выключать. **Lock to pixels** и увеличение сэмплов для расчета величин - два основных метода борьбы с миганиями (**flickering**) в анимациях, рассчитываемых при помощи **VRay**.

Adaptation by effect on final result (importance sampling) - техника, используемая для выбора сэмплов. При расчете интеграла освещенности методом Монте-Карло используются выбранные по некоторому случайному закону значения подынтегральных функций (сэмплы) в пределах области определения функций (полусфера над расчетной точкой для непрозрачной поверхности и сфера - для прозрачной). Интересно, что сэмплы могут иметь геометрическую интерпретацию как направления, вдоль которых вычисляются значения функций - другими словами, как испускаемые из точки лучи сэмплирования. Техника **importance sampling** для выбора сэмплов использует принцип важности или значимости величины конкретного сэмпла для конечного результата. Если сэмплирующий луч вдоль некоторого направления возвращает малое значение освещенности или даже ноль, дальнейшее сэплирование в этом и близких направлениях не ведется. Другой пример - для вычисления темного размытого преломления не требуется большого количества сэмплов. В любом случае, включение параметра **importance sampling** будет заставлять движок **VRay** искать и отбирать для расчетов наибольшие по значению (и поэтому - более важные для изображения) сэмплы и отбрасывать вычисление сэмплов с малыми значениями. Параметр **Amount** управляет тем, насколько интенсивно техника **importance sampling** будет использоваться при вычислениях. Нулевое значение **Amount** полностью отключает использование **importance sampling**, а при **Amount = 1** каждый сэмпл будет проходить отбор. В большинстве случаев использование техники **importance sampling** очень благотворно сказывается на рендерах - приводит к существенному ускорению расчетов при сохранении достаточно высокого качества. Однако техника **importance sampling** в силу своей случайной природы может давать досадные осечки - как это ни парадоксально, иногда ее отключение может быть очень полезным, поскольку это позволяет уменьшить шум в расчетах. Таким образом, уменьшение **Amount** приводит к повышению качества рендера и увеличению времени расчетов. Тактика в отношении этого параметра может быть следующей - увеличивать **Amount**, если это не приводит к серьезному ухудшению качества изображения и уменьшать, если в рендере имеется неустранимый никакими другими средствами шум. По умолчанию **Amount=1**.

Adaptation by sample values (early termination) - позволяет **VRay** анализировать величины сэмплов и обрывать процесс сэмплирования, если эти значения приблизительно одинаковы. Другими словами, если значения сэмплов мало отличаются друг от друга, вместо дальнейшей трассировки новых сэмплов используются усредненные значения уже вычисленных сэмплов. Если сэмплы сильно отличаются по значению, берется большее их количество. Параметр **Amount** определяет степень применения этой техники - при **Amount=0** техника вообще не используется, при **Amount=1** **early termination** использует самое минимальное, какое только возможно, количество сэмплирующих лучей. Если требуется высокое качество расчетов, следует использовать **Amount=0**, но заплатить за это придется увеличением времени рендеринга. Тактика в отношении этого параметра аналогична тактике в отношении **importance sampling**, значение **Amount** по умолчанию - **0.85**.

Min. samples - устанавливает минимально возможное количество сэмплов. То есть, количество сэмплов для расчета некоторой величины не может быть меньше значения этого параметра.

Noise threshold - судья, арбитр, единолично решающий, когда вычисленные значения достаточно хороши для изображения. Вычисляемое значение величины сравнивается поэтапно само с собой. Если разница больше значения **Noise threshold**, вычисляются дополнительные сэмплы, если разница меньше, вычисления завершаются. Очевидно, этот параметр имеет самое непосредственное влияние на качество (зашумленность) и скорость рендера. Его увеличение может сделать расчет очень быстрым и очень "шумным", уменьшение - наоборот.

Описанные выше параметры позволяют **VRay** динамически принимать решения о количестве сэмплов для расчета той или иной конкретной величины непосредственно в процессе расчетов. Если **Amount** для **importance sampling** и **early termination** имеют нулевые значения, мы получим рендер, максимально возможный для **VRay** по качеству. Время расчета тоже будет максимальным, а количество сэмплов будет приближаться к количеству **subdivs**, указываемых для **GI** в настройках источников света. Если **Amount** для **importance sampling** и **early termination** равны единице, рендер будет минимального (но это вовсе не означает - плохого) качества, время расчета тоже будет минимально возможным, а количество сэмплов будет приближаться к значению, указанному в **Min. Samples**. Это как бы два противоположных полюса, в пределах которых расположены все промежуточные настройки, затрачиваемое на расчет время и степень качества рендера.



Рис.02-08. Время расчета для обоих значений Amount = 0, Noise threshold=0.005.



Рис.02-09. Время расчета для обоих значений Amount = 1, Noise threshold=0.005. Визуально изображение идентично предыдущему, но время расчета в 2.5 раза меньше.



Рис.02-10. Время расчета для обоих значений Amount = 1, Noise threshold=0.1. Уменьшение Noise threshold еще больше ускорило расчет, но совершенно погубило качество изображения (шум в углах и на стыках стен и пола, "зернистость" тени).

Выставленные в **VRay** значения по умолчанию параметров **Amount** и **Noise threshold** являются довольно универсальными и пригодны в большинстве случаев, или - как стартовые значения для собственных экспериментов. Менять их следует только тогда, когда возникает настоящая и глубоко осознанная необходимость. Не рекомендуется устанавливать в **0** значение **Noise threshold** - это может привести **VRay** к бесконечному циклу вычислений, или, что произойдет скорее всего, - к аварийному завершению работы программы.

QMC - квази Монте-Карло метод, используемый **VRay**, отличается от "классического" Монте-Карло как раз благодаря использованию **early termination** и **importance sampling**. Они позволяют выбирать сэмплы, что делает их "не чисто" случайными, как того требует стандартный метод М-К.

Вычисления GI (Global Illumination)

Для расчета первой компоненты - прямого освещения, **VRay** обладает отдельным алгоритмом, способным работать независимо. Убедиться в этом просто, достаточно отрендерить трехмерную сцену без **GI** (убрать галочку в **checkbox "On"** на закладке **VRay: Indirect Illumination**). В арсенале средств модуля расчета прямого освещения имеется возможность обработки пространственных источников, так что посчитать мягкие тени не составляет никаких проблем. Настройки расчета прямого освещения

присутствуют в параметрах источников света и теней (затухание, тип источника, параметры теней и др.).

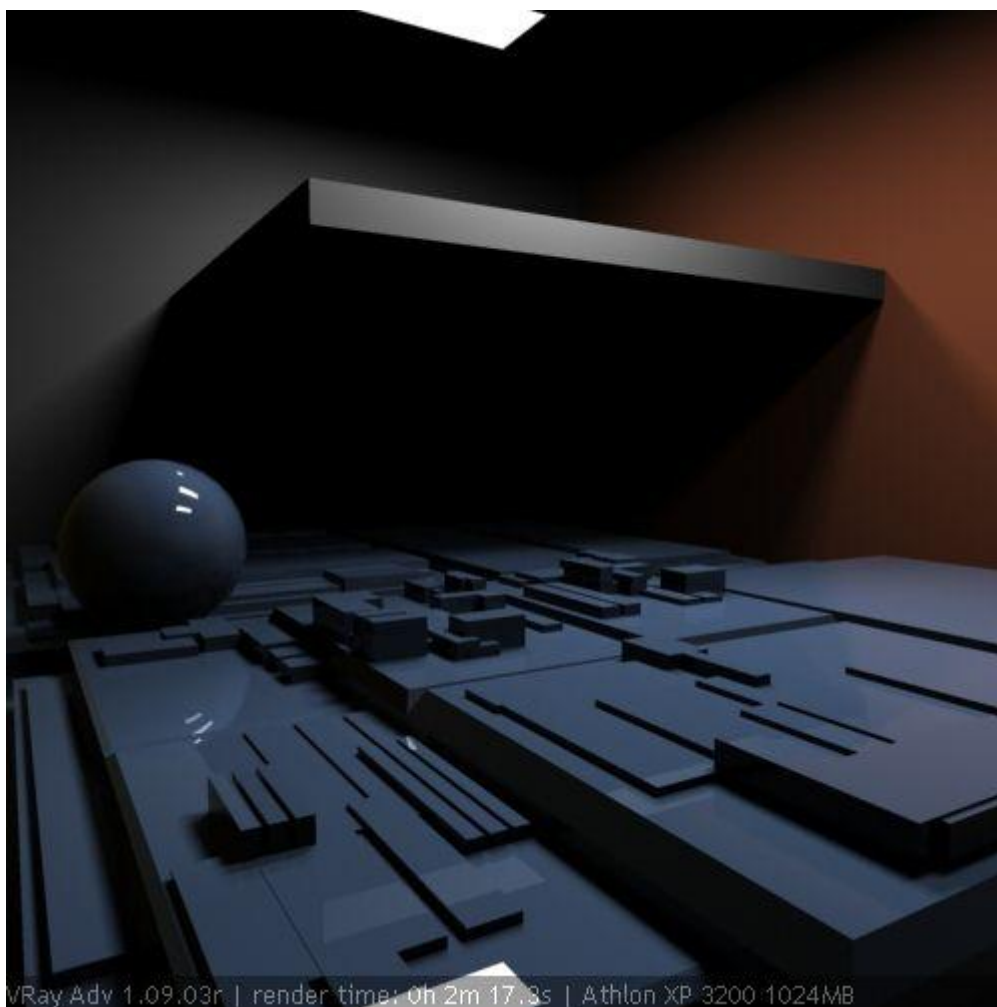


Рис.02-02. Расчет только прямого освещения. Все области вне прямой видимости источников света находятся в глубокой тени. Мягкие тени - результат работы с пространственными источниками света.

Отключить расчет прямого освещения вполне возможно, для этого нужно воспользоваться кнопкой **Exclude** в настройках источников света. Этот прием полезен для визуального анализа карт в "чистом виде" и влияния на них настроечных параметров. Например, исключение объектов из освещения никак не скажется на фотонной карте, поскольку она рассчитывается, если в свойствах источника установлено **Generate diffuse**, то есть - излучать фотоны. Расчет фотонной карты может быть отключен только там. Можно и выборочно включать/исключать объекты из фотонной карты, если в свойствах конкретных объектов убирать галочки в **Receive GI** и **Generate GI** (закладка **VRay: System > Object settings**).

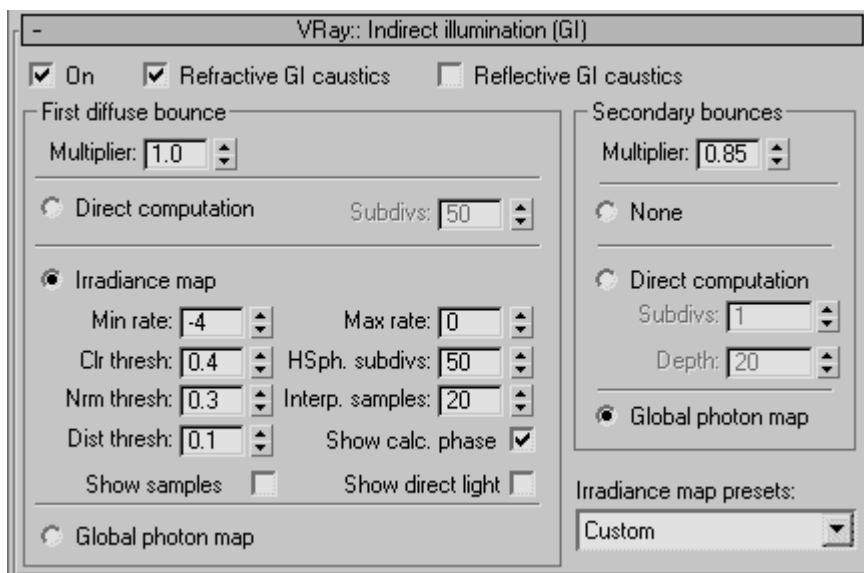
Имеется в **VRay** и собственный алгоритм обратной трассировки лучей, который также является самостоятельной и независимой частью системы расчета. Часть настроек **ray tracing** расположена на закладках **VRay: Global Switches** и **VRay: Image Sampler (Antialiasing)**, часть вынесена в параметры материалов типа **VRayMtl**.

Расчет третьей компоненты освещения - отраженного диффузного освещения является одним из важнейших алгоритмов **VRay** и тоже достаточно независим от расчета других компонентов освещенности. Основные настройки расчета **GI** расположены на закладках **VRay: Indirect Illumination**, дополнительные - разбросаны фактически по всем закладкам **VRay**. Мы рассмотрим большинство из них - в свое время. Расчет **GI** можно

произвольно включать и отключать при помощи **check box "On"** на закладке **VRay: Indirect Illumination**.

Настройки расчета четвертой компоненты - **caustic**-эффектов освещения, расположены в **VRay: Caustic** и **VRay: System (Object settings и Light settings)**.

Таким образом, **VRay** обладает четкой модульной структурой, позволяющей отключать или включать расчет той или иной компоненты освещенности независимо от остальных, что удобно для их настройки. Далее подробно мы будем рассматривать только расчет непрямого диффузного освещения (**GI**).



Основные настройки расчета GI.

Для расчета только **Indirect Illumination VRay** предлагает три основных способа:

- **Direct computation;**
- **Irradiance map;**
- фотонные карты (**Global photon map**).

Сразу обращает на себя внимание такая особенность расчетов, как разделение всех видов диффузных отражений на два - первый диффузный отскок (свет сначала достигает некоторой поверхности, диффузно отражается от нее только один раз и затем попадает в точку, освещенность которой рассчитывается) и все остальные отскоки (свет, который до момента попадания в расчетную точку диффузно отражается поверхностями сцены два и больше раз). Смысл такого разделения уже обсуждался выше - это связано с важностью вклада именно первого диффузного отражения (первого диффузного отскока фотона), вклады от остальных очень быстро затухают по мере увеличения числа переотражений. Для расчета этих двух видов отскоков могут быть использованы четыре различных сочетания упомянутых трех способов расчета:

- **Direct computation** для первого диффузного отскока и **direct computation (direct+direct)** или **photon map (direct +photon)** для остальных отскоков;
- **Irradiance map** для первого диффузного отскока и **direct computation (irr_map+direct)** или **photon map** для остальных отскоков (**irr_map+photon**).

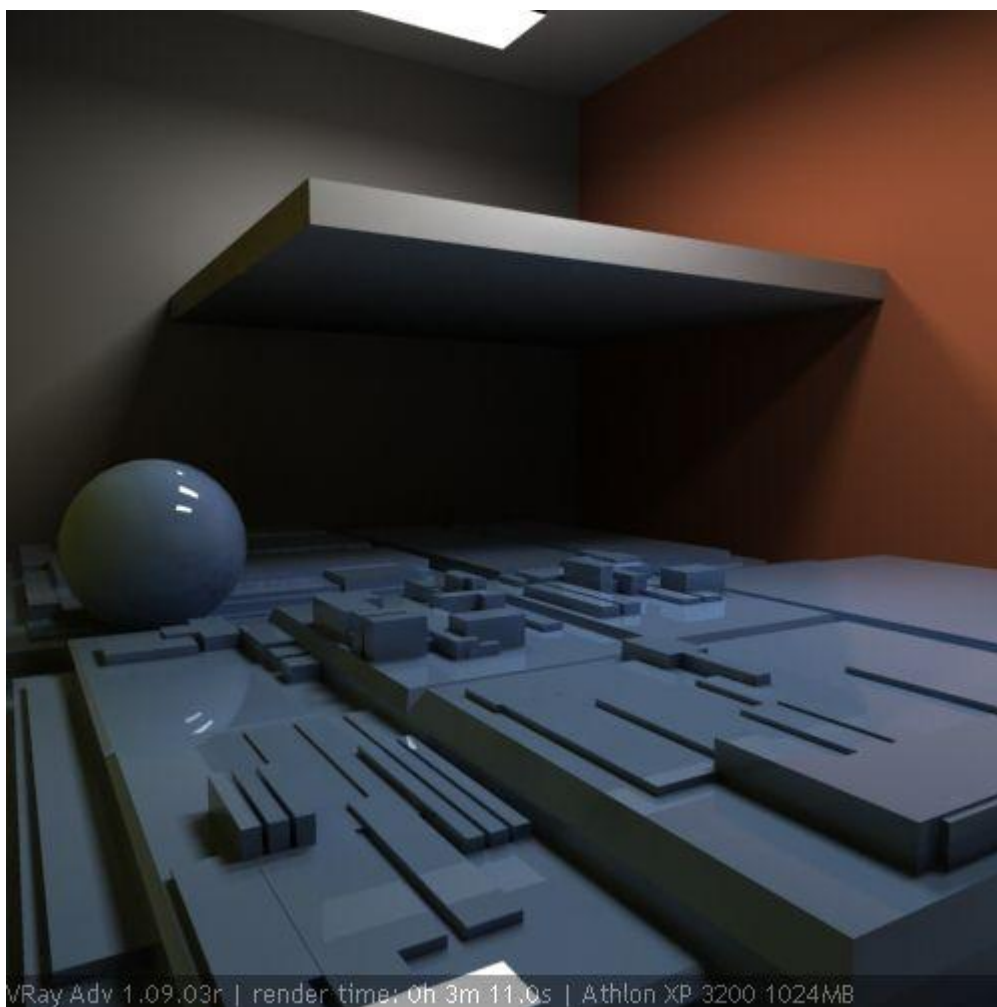


Рис.02-04. Только прямое и однократно переотраженное диффузное (первый диффузный отскок - first diffuse bounces) освещение.

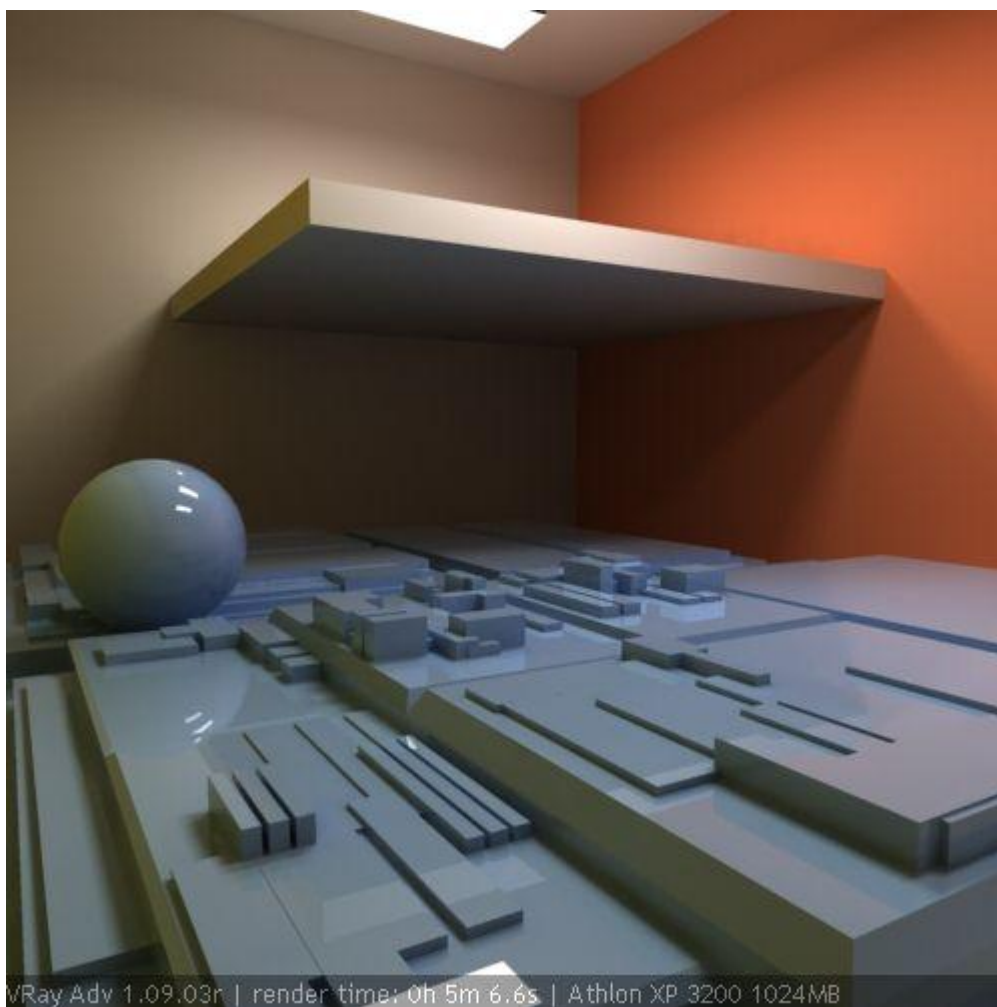


Рис.02-05. Прямое и все типы вторичного освещения, рассчитанные методом irradiance map для первого диффузного отскока и методом фотонных карт для остальных диффузных отскоков.

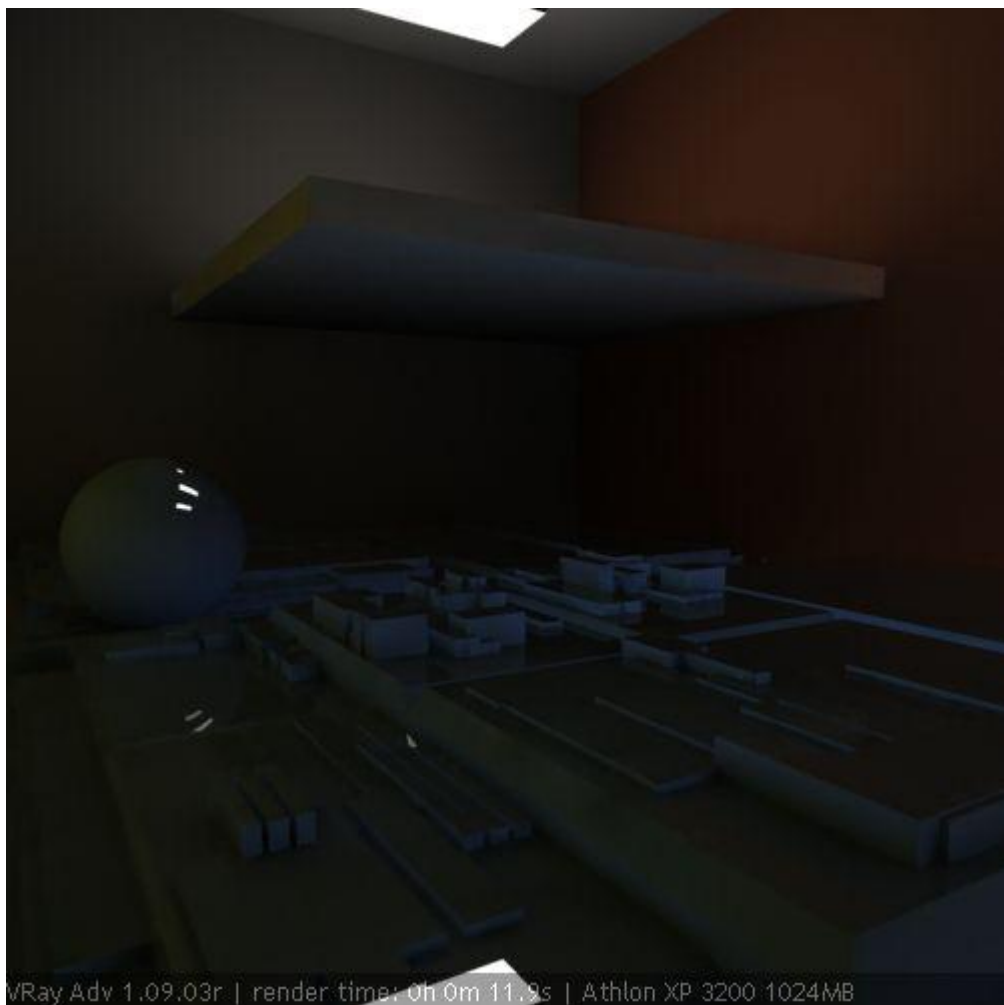


Рис.02-05а. Только первый диффузный отскок (первое диффузное переотражение), рассчитанное методом irradiance map. Увидеть эту карту можно, рассчитав прямое освещение и GI с first diffuse bounces - on, secondary bounces - off и сохранив рассчитанную irradiance map в файл. Затем выключаем все объекты сцены из прямого освещения и рендерим с загрузкой irradiance map из файла.

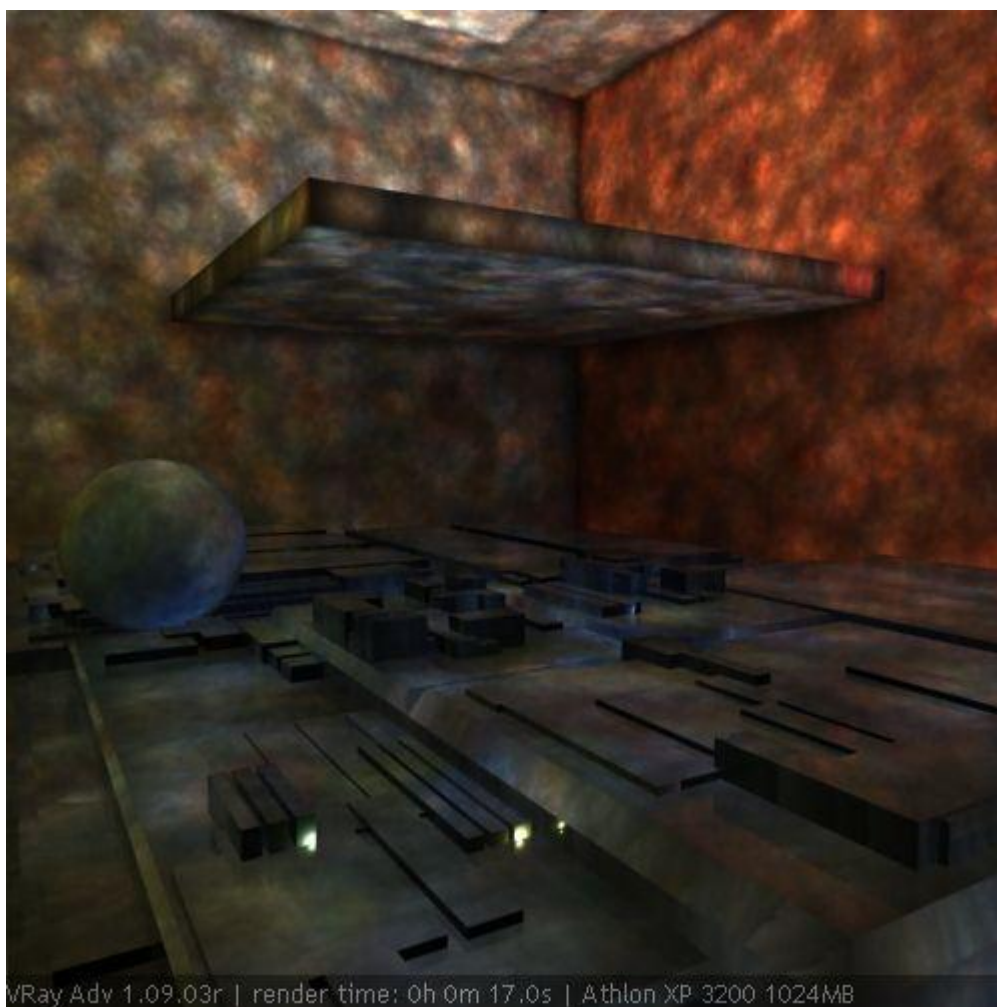


Рис.02-05b. А так выглядит фотонная карта в "чистом виде". Чтобы ее увидеть, исключаем объекты из прямого освещения и считаем first diffuse bounces>Global photon map, secondary bounces - off.

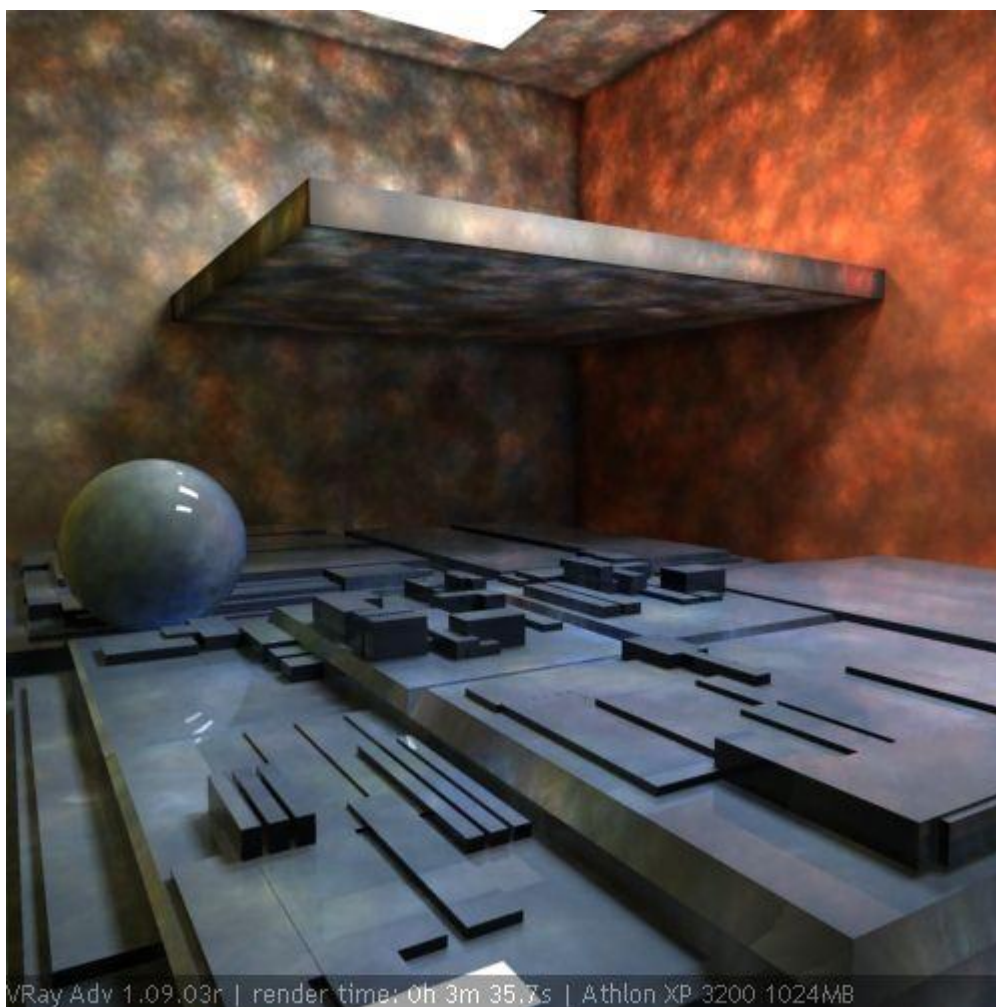


Рис.02-05с. Фотонная карта и прямой свет, без первого диффузного отскока.

Direct computation (DC) использует для расчета диффузной освещенности метод Монте-Карло. Другое название этого способа вычислений - **brute force**, что можно перевести как "грубая сила". При вычислениях **direct+direct** для каждой точки изображения строится полусфера единичного радиуса и выполняется сэмплирование (количество сэмплов указывается в настройке **Subdivs** группы **First diffuse bounces>Direct computation**) подынтегральной функции, основная часть которой - это диффузная часть **BRDF**. Сэмплирование **BRDF** означает случайный выбор одного из ее конкретных значений, а это равносильно выбору конкретного направления (угла) падения света. В этом направлении трассируется луч до новой точки пересечения с ближайшей поверхностью. В новой точке пересечения вычисляется ее прямое освещение (это и будет первый диффузный отскок) и для расчета более высоких отражений процесс должен повториться - построение полусферы (или сферы для прозрачной поверхности), сэмплирование в количестве **subdivs** группы **Secondary bounces>direct computation**, новая трассировка лучей и так далее до исчерпания **Depth** - глубины трассировки. Поскольку переотраженное диффузное освещение очень быстро затухает с возрастанием количества отражений, еще одним ограничителем на количество сэмплов и глубину трассировки, кроме **Depth**, выступает **QMC Sampler** - срабатывает **importance sampling** и **early termination**.

Вычисление при помощи "грубой силы" дает очень точное распределение полутеней в сцене (светотеневых переходов) совершенно без размытия. Но расчет выполняется очень долго. Нет, действительно - очень долго. Например, если выбрать количество **Subdivs** равным **50** для обоих видов отскоков, то количество сэмплов для одной точки составит **2500** лучей, а это **2500** новых точек, в каждой из которых будут

трассироваться свои **2500** лучей, и каждый из них даст свои **2500** точек и так далее, пока допускают настройки **QMC**. Процесс очень быстро приобретает лавинообразный характер, и все это громадное количество лучей **DC** должен совершенно честно просчитать. Количество сэмплов вторичных отскоков у **VRay** по умолчанию равно одному лучу, этого оказывается вполне достаточно для хорошего качества в большинстве случаев и серьезно уменьшает количество расчетов. Кроме высокой точности светотени и медленности расчетов, недостаток **DC** - шум, связанный с тем, что расчеты выполняются индивидуально для каждой точки. Избежать шума можно только одним способом - поднять количество сэмплирующих лучей (**Subdivs**), что не самым лучшим образом скажется на времени расчетов. Поэтому, **direct+direct computation** используется на практике довольно редко и в основном - для **reference**-изображений, помогающих понять, как должен быть распределен вторичный свет в сцене (в этом случае шум не важен).

В случае использования **direct +photon**, трассировка из расчетной точки выполняется только до ближайших поверхностей, где рассчитываются их прямые освещенности, а освещенность от остальных отскоков оценивается из плотностей фотонных карт в точках пересечения в пределах заданного радиуса (параметр **Search distance** фотонной карты). Этот метод быстрее предыдущего, и может быть даже более точным при достаточно высокой плотности фотонных карт.

Существует еще один способ использования фотонных карт - для выбора (предсказания) таких направлений **DC**, которые обеспечивают существенный вклад в расчеты. В самом деле, зачем наугад "палить" сэмплами в окружающее пространство, если известно, по каким направлениям прилетают фотоны!? К сожалению, похоже, что **VRay** этот трюк не использует.

Irradiance map

Отличие расчета методом **irradiance map** от **direct computation** состоит только в том, что расчет выполняется не для всех точек изображения, а лишь для некоторых. Освещенность остальных точек интерполируется по найденной освещенности ближайших расчетных точек (метод так называемых световых градиентов) в пределах радиуса, задаваемого в параметре **Interp. Samples** группы **First bounces>Irradiance map**. Это позволяет рассчитывать освещенность только в тех местах трехмерной сцены, где это действительно необходимо - в областях резкого изменения освещенности или геометрии поверхности, и аппроксимировать цвет на равномерно освещенных плоских участках поверхностей.

Отбор точек для расчета и сохранения в **irradiance map** происходит поэтапно, начиная с некоторого самого низкого разрешения изображения и до максимального разрешения. Минимальное разрешение определяется параметром **Min. rate**, максимальное - **Max. rate** группы параметров **First diffuse bounces>Irradiance Map**, значения этих параметров являются степенями двойки. Так что значение **-2** соответствует одной четвертой, а ноль - единице. Расчет **irradiance map** выполняется несколько раз, каждый раз все более точно, адаптивно повышая качество. Например, если **Min. Rate = -3**, а **Max. Rate = 0**, расчет **irradiance map** будет выполнен четыре раза: **(-3, -2, -1, 0)**. В качестве исходного разрешения принимается разрешение рассчитываемого изображения, уменьшенное в соответствующее количество раз. Для **-3** на первом проходе действительно рассчитываться будет только каждый восьмой пиксел изображения. На следующем шаге рассчитанные соседние освещенности сравниваются между собой, если отличие в освещенности точек, их нормалях или пространственная близость объектов оказываются больше некоторых пороговых величин, из каждой группы выбирается и рассчитывается дополнительный пиксел.

Пороговые значения для освещенностей (цвета) указываются в параметре **Clr. thresh**, для нормалей - в **Nrm. thresh**, для взаимного пространственного положения - в **Dist. thresh**. После того, как все шаги будут выполнены, результат расчета может быть

сохранен в файл. Это, собственно, и есть карта освещенности - **irradiance map**. Из-за сохранения результатов расчета в файл, метод **irradiance map** еще называют кэшированием. Затем наступает очередь финального рендера на полном разрешении, при этом уже рассчитанные освещенности пикселей изображения берутся из **irradiance map**, а остальные интерполируются градиентами по вычисленным значениям. На этапе финального рендера могут быть вычислены дополнительно еще некоторые точки - этот процесс активизируется установками суперсэмплинга. Суперсэмплинг имеет свои пороговые величины для изменения освещенности пикселей, которые могут не совпадать с **Clr. thresh**, и если они меньше - будет выполняться дополнительный просчет некоторых точек.

Из последнего замечания можно сделать вывод, что установки суперсэмплинга можно упрощать на этапе настройки **irradiance map** для ускорения расчетов, и устанавливать для них требуемое высокое качество уже после расчета и сохранения **irradiance map**, непосредственно перед финальным рендером. В отличие, от **direct computation**, для которого настройки суперсэмплинга должны быть указаны еще до начала расчетов. Таким образом, **irradiance map+photon map** обладают максимальной гибкостью в отношении настроек суперсэмплинга - их можно менять без пересчета как **irradiance map**, так и **photon map**, что допускает экспериментирование "малой кровью" с настройками суперсэмплинга.

Второй практический вывод касается зависимости значений **Min. rate** и **Max. rate** от разрешения рассчитываемого изображения - при увеличении разрешения эти величины можно уменьшать и наоборот. Например, если пара значений **Min. rate = -3 Max. rate = 0** хорошо работает для изображения **800x600** пикселей, то для разрешения **1200x1024** вполне можно использовать **Min. rate = -4 Max. rate = -1**, а для еще более высоких разрешений эти значения можно ставить еще меньше. Связано это с тем, что при увеличении разрешения увеличивается количество рассчитываемых точек - одна и та же область трехмерной сцены представляется БОЛЬШИМ количеством пикселей.

Собственно расчет освещенности точек выполняется аналогично **direct computation** - сэмплируется полусфера, находятся точки пересечения, рассчитывается прямая освещенность, если для вторичных отскоков используется тоже **direct computation** - строятся новые полусферы, если фотонные карты - происходит оценка освещенности по плотности фотонов. В общем - как обычно :). Но еще одна важная особенность расчета **irradiance map** и **first diffuse bounce** в целом - то, что на этапе вычислений первого диффузного отскока происходит подключение (читай - смешивания, сложения) как прямого освещения, так и освещения **secondary bounces**. Такова особенность **VRay**. Он не хранит все компоненты освещенности по отдельности, расчет первого отскока выполняется с учетом прямого освещения и остальных переотражений и результат записывается в файл. И если прямое освещение все же не хранится самой **irradiance map**, его можно отключать/включать, то многократные переотражения после расчета самостоятельного значения уже не имеют. То есть, если рассчитанная с учетом фотонной карты **irradiance map** сохранена в файле для дальнейшего использования, то загрузку фотонной карты из файла как и расчет **secondary bounces** можно отключать и это никак не скажется на конечном результате. Другой пример. Рассчитаем **irradiance map** без **secondary bounces** и сохраним в файл. Рассчитаем фотонную карту и тоже запишем в файл. Если теперь при рендере для **first diffuse bounce** использовать **irradiance map** из файла, а для **secondary bounces** - записанную фотонную карту и посчитать освещение, то сложения освещенностей не произойдет. Мы увидим только **irradiance map** и прямое освещение. Эта особенность расчетов **GI** в **VRay** имеет и положительные стороны - размер **irradiance map** гораздо меньше размера фотонной карты. А вышеописанная особенность позволяет нам использовать только **irradiance map** для дальнейших расчетов, если она предварительно рассчитана с учетом фотонной карты, и забыть о многомегабайтной фотонной карте.

Метод расчета **irradiance map** выполняется гораздо быстрее **direct computation** и без потери качества изображения. Поэтому, он является основным для расчета первого диффузного отскока. Адаптивный расчет по выбираемым точкам - очень интересная

находка **VRay**, являющаяся его существенным преимуществом. Так, расчет **GI** при помощи **irradiance map + photon map** в **VRay** аналогичен расчету **GI** в **mental ray** при помощи сочетания фотонных карт и **final gathering**. Однако, **final gathering**, в отличие от **irradiance map**, выбирает точки для расчета равномерно на основе заданного значения радиуса и без учета изменения цвета и геометрии. Поэтому, для получения сопоставимых по качеству с **irradiance map** результатов, **final gathering** должен использовать большее количество точек, а значит - выполняет расчеты медленнее.

Что касается времени расчетов, **direct+direct** будет самым медленным, **direct+photon map** и **irradiance map + direct** будут конкурировать по времени, **irradiance map + photon map** - самый быстрый способ расчета, обеспечивающий, к тому же, и высокое качество изображения в силу физической корректности принципа фотонных карт. Поэтому, именно это сочетание наиболее часто используется на практике. Но бывают исключения. Типичный пример - расчет ночного освещения с использованием фотонных карт. Поскольку фотонов мало вследствие малой интенсивности источников света (ночь же), может потребоваться очень большое время для их накопления. Другой пример - отсутствие диффузной компоненты у материалов. В этом случае расчет фотонных карт может превратиться в бесконечный процесс с нулевым результатом, поскольку фотонные карты могут быть построены только для поверхностей с ненулевыми диффузными свойствами. Еще один типичный пример - расчет открытых пространств с использованием **Skylight**. Впрочем, последний пример поддается "лечению" правильной настройкой источников света и карт.

Теперь немного поговорим о параметрах самих карт - **irradiance** и фотонных.

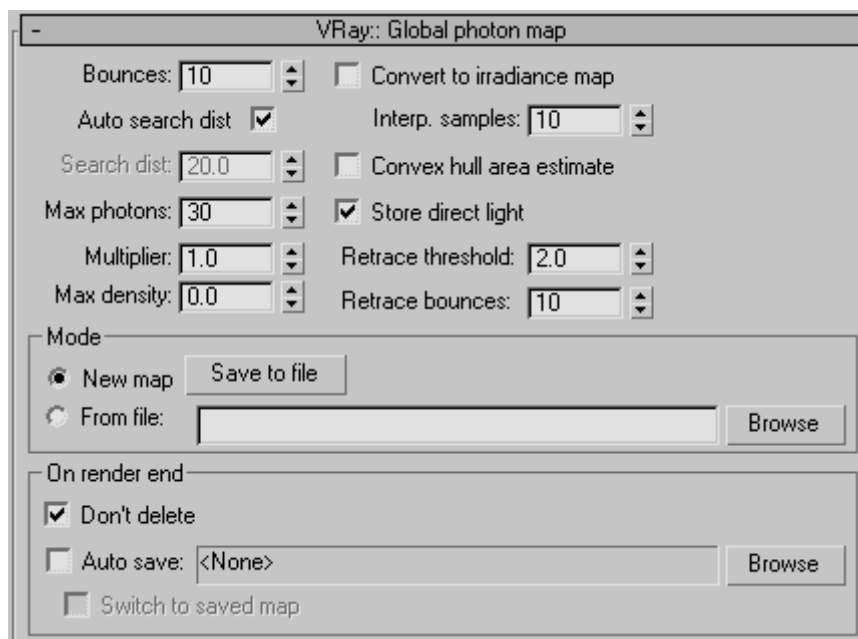
Фотонные карты (Photon map)

Идея фотонных карт (ФК) проста - от источника света во всех направлениях излучаются порции энергии света - "фотоны". Каждое направление отслеживается (трассируется) до столкновения с ближайшим объектом сцены и здесь моделируется "взаимодействие" фотона с поверхностью. Результат взаимодействия записывается в специальную базу данных, которая и является собственно фотонной картой. Под взаимодействием подразумевается, что фотон может поглотиться поверхностью, отразиться от нее зеркально или диффузно или пройти через прозрачную поверхность в соответствии с законом преломления или диффузно. Какое именно событие произойдет, зависит, во-первых, от свойств поверхности (диффузные, отражательные и прозрачные свойства и коэффициенты материалов), во - вторых - от результата "русской рулетки".

Русская рулетка - генератор случайных чисел, использующий сумму коэффициентов диффузного отражения, зеркального отражения и коэффициента прозрачности. Поскольку вероятность всегда нормирована к единице, сумма этих коэффициентов тоже не должна превышать единицы. Именно это обеспечивает параметр **Energy preservation mode** материала **VRay** (при этом для **RGB** считается, что **0-255** соответствует диапазону **0-1**) и возможно именно поэтому фотонные карты в **VRay** можно создать только для поверхностей с материалами типа **VRayMtl**. Суть "русской рулетки" - чем больше значение того или иного коэффициента, тем больше вероятность, что произойдет соответствующее ему событие - поглощение, отражение или преломление.

После взаимодействия фотон трассируется по новому направлению до следующей поверхности, где все снова повторяется. Глубина трассировки задается в **VRay** параметром **Bounces** закладки **VRay: Global Photon map**. При достижении заданной глубины (количества взаимодействий фотона с объектами), отслеживание фотона прекращается. В фотонных картах всех поверхностей, с которыми взаимодействовал фотон, сохраняется информация о координатах столкновения, энергии фотона и его направлении прилета. Фотонная карта для поверхности создается только в том случае, если она обладает ненулевыми диффузными свойствами.

Для успешного использования фотонных карт нужно особенно четко понимать одну вещь - один отдельный фотон не может корректно определить освещенность точки. Для определения освещенности точки используется сбор некоторого количества фотонов, ближайших к координатам точки, и суммирование их энергий с определенными весовыми коэффициентами. Радиус сбора задается параметром **Search distance** закладки **VRay: Global Photon map**.



Параметры настроек фотонной карты

Чем больше фотонов собирается, тем точнее оценка освещенности точки. Но это "палка о двух концах" - если плотность фотонной карты мала, сбор большого количества фотонов приведет к размыванию освещенности. По умолчанию **VRay** использует **Auto Search dist** - сам ищет оптимальный радиус сбора фотонов, при этом **Search dist** недоступен для редактирования. **Auto Search dist** к применению не рекомендуется - его нужно отключать и использовать собственные значения для **Search dist**.

Еще одно средство в борьбе с размыванием освещенности - параметр **Max. photons**, определяет число собираемых фотонов, а не радиус сбора. Различие **Search dist.** и **Max. photons** состоит в том, что при установленном значении **Search dist** будет меняться количество реально собираемых фотонов в зависимости от плотности фотонной карты. При установленном значении **Max. photons** число собираемых фотонов будет неизменно, а изменяться будет радиус сбора в зависимости от плотности фотонной карты. При совместном использовании, эти параметры конкурируют между собой по принципу "кто быстрее". Если в данной точке поверхности быстрее собирается число фотонов, указанное в **Max. Photons**, значение радиуса сбора игнорируется. Если в пределах заданного радиуса не удастся собрать заданное число фотонов, сбор прекращается, значение **Max. Photons** игнорируется, а число собранных фотонов определяется плотностью в заданном радиусе **Search dist**.

На практике обычно используется один из этих параметров - **Search distance (Max. Photons** выставляется в **0**, что заставляет **VRay** игнорировать его). Однако принцип конкуренции можно использовать для того, чтобы заставить работать обе настройки в зависимости от плотности фотонной карты. Если выставить значение **Max. photons** равным числу фотонов, собираемых в пределах **Search dist.** в наименее плотных частях фотонных карт, то для областей с более высокими плотностями будет срабатывать ограничение **Max. Photons**, а для областей с низким значением плотности - ограничение **Search distance**. Это приведет к тому, что радиус сбора фотонов будет изменяться в

пределах сцены в зависимости от плотности фотонных карт, что уменьшает размывание светотеневых переходов и особенно - в области средних тонов.

Хотя фотонная карта дает физически точную картину распределения света в сцене, для достижения точных результатов требуется высокая плотность фотонных карт, то есть - испускание большого их количества. К сожалению, **32-битная** операционная система современных персональных компьютеров ограничивает количество доступной памяти **2** гигабайтами и для системы, и для запущенных в ней процессов, что серьезно ограничивает возможности применения фотонных карт. Когда мы все будем работать на **64-битных** ОС с их **8** терабайтами на процесс, возможно все **GI** будет считаться только фотонами :). А пока **8-10** миллионов записей о фотонах, в зависимости от сложности сцены, являются абсолютным пределом объема фотонной карты. И опять, в **VRay** используется очень интересное решение, позволяющее до некоторой степени преодолеть ограничения на память.

Параметр **Max. density** закладки **VRay: Global Photon map** позволяет "сжимать" данные фотонной карты. Делается это следующим образом. Вместо того чтобы записывать всю информацию (энергия-направление-координаты, объем одной записи составляет **30** байт) о каждом фотоне в карту сначала анализируются уже имеющиеся записи. Если вблизи координат прилетевшего фотона уже имеется запись о "подходящем" фотоне, энергия нового фотона просто суммируется с энергией старой записи. Таким образом, энергия фотона "бесплатно" сохраняется в фотонной карте. Степень близости и определяется параметром **Max. Density**. Чем больше значение параметра, тем больше радиус, в пределах которого просматривается фотонная карта и тем больше вероятность нахождения подходящего старого фотона. Если **Max. Density = 0**, все фотоны сохраняются в карте: суммирование отсутствует, полностью записываются координаты, направление и энергия для каждого фотона. Если в сцене используются миллиметры в качестве единиц измерения, то значения **Max. Density = 5** или **10** вполне достаточно, чтобы обработать излученные **50-100** миллионов фотонов. Остается все же один вопрос - что подразумевают разработчики под "подходящим" фотоном? Имеется ли в виду только близость координат, или учитывается также схожесть направлений и энергий фотонов?

Степень сжатия фотонной карты не лучшим образом сказывается на качестве изображения. Это следует из взаимосвязи **Max. Density** и **Search dist.** - увеличение **Max. Density** неизбежно приводит к увеличению радиуса сбора фотонов, то есть - к увеличению размывания светотени. Кроме того, суммирование фотонов в пределах **Max. Density** также приводит к размыванию деталей освещенности. Поэтому, на практике стремятся к наименьшему из возможных значений **Max. Density**, при котором достигается требуемая плотность фотонной карты.

Еще одной замечательной возможностью **VRay** являются алгоритмы отработки границ объектов для фотонных карт. Поскольку одними только фотонами невозможно получить непрерывную четкую линию границы объекта или границы стыков поверхностей, **VRay** предлагает два способа получения четких границ. Первый - **Convex hull area estimate**, приблизительно аппроксимирует освещенность границы по ближайшим фотонам. Сами разработчики довольно прохладно относятся к этому методу, тем не менее, из практики известно, что **Convex hull** работает довольно хорошо. **Convex hull** работает лучше, если параметр **Max. photons** имеет ненулевое значение.

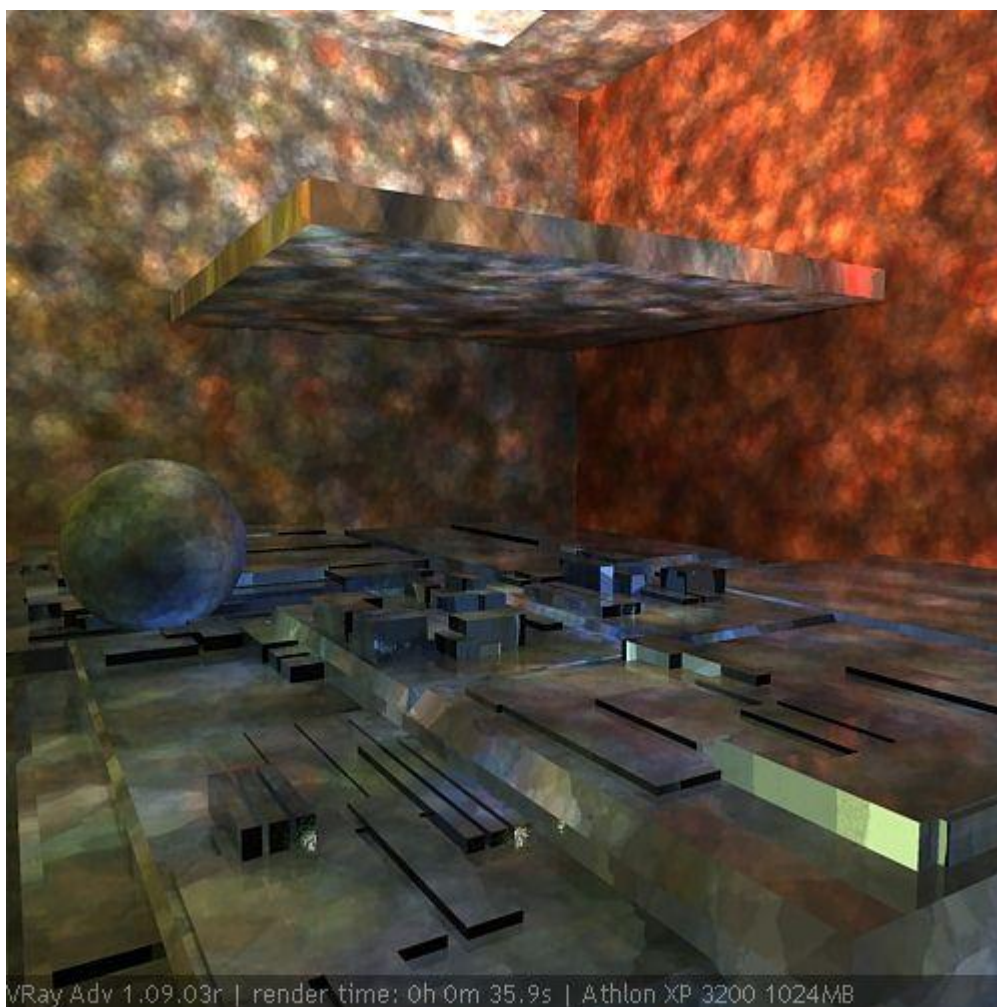


Рис.02-05d. Фотонная карта с включенным параметром Convex hull area estimate. Сравните с рис. 02-05b - отсутствует почернение ребер, углов и стыков.

Второй способ - использовать для расчета освещенности границы **direct computation**. Достигается указанием значения **Retrace threshold** - расстояния от границы, откуда начать расчет и **Retrace Bounces** - количество рассчитываемых отскоков, оно должно быть равным параметру **Bounces** фотонной карты. Этот метод требует большего времени и не всегда дает лучшие результаты. Кроме того, иногда граница все же может в результате расчетов несколько отличаться по цвету от остальной поверхности, что потребует корректировки **Retrace Bounces** (меньше - темнее, больше - светлее) и дополнительных расчетов. Оба способа достаточно широко используются.

Store direct light позволяет сохранить в фотонной карте информацию о прямой освещенности. В терминах фотонной карты первое столкновение каждого фотона с поверхностью и есть, по сути, прямое освещение (не путать с первым диффузным столкновением, который является вторым столкновением фотона с поверхностью). Обычно, самый первый отскок фотона в картах не сохраняется, чтобы исключить дублирование расчетов прямого освещения.

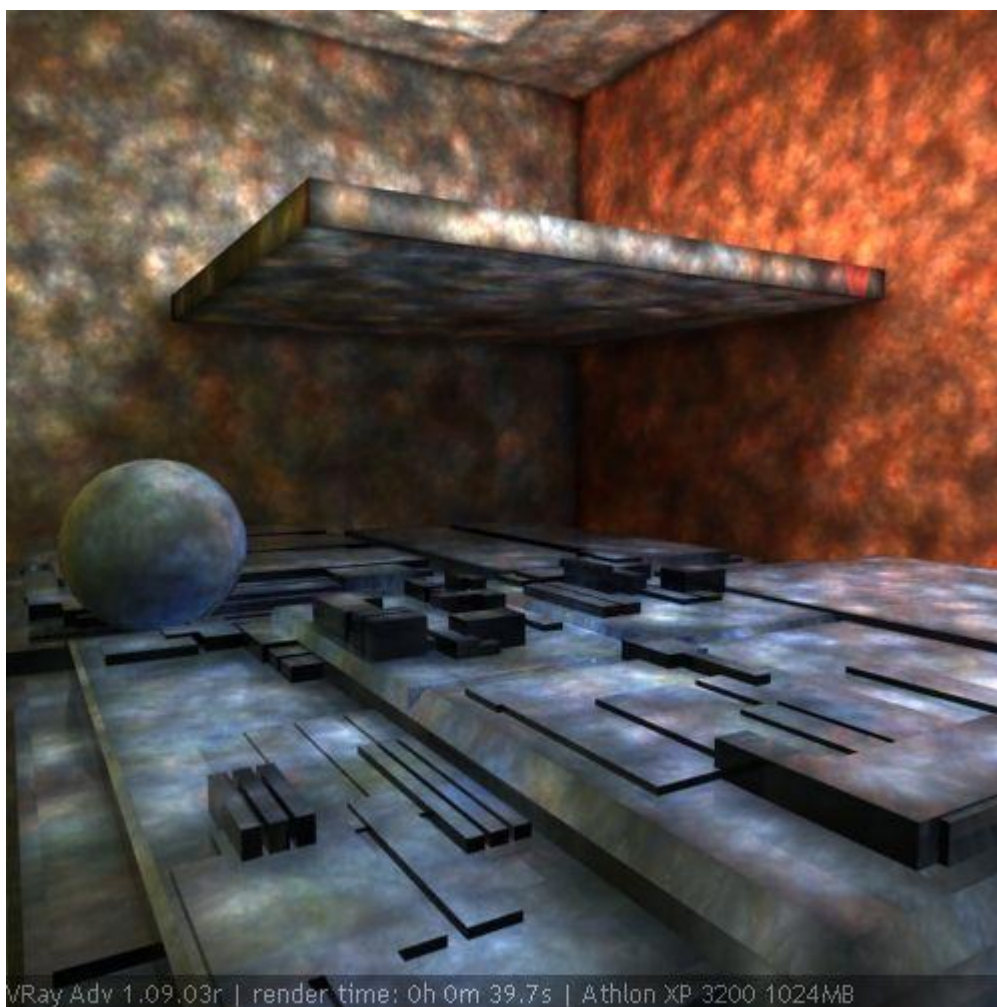


Рис.02-05е. Фотонная карта с включенным параметром Store direct light. Сравните с рис. 02-05b, рассчитанной без Store direct light и с рис.02-05с, рассчитанным с прямым освещением и фотонной картой.

Convert to irradiance map предназначен для промежуточного вычисления освещенности по фотонной карте. Позволяет ускорить расчет **irradiance map**. Использование конвертации равносильно "запеканию" фотонов карты в количестве **Interp. samples** в световые пятна, а параметр **Interp. samples** определяет используемое для этого количество фотонов вблизи точки.

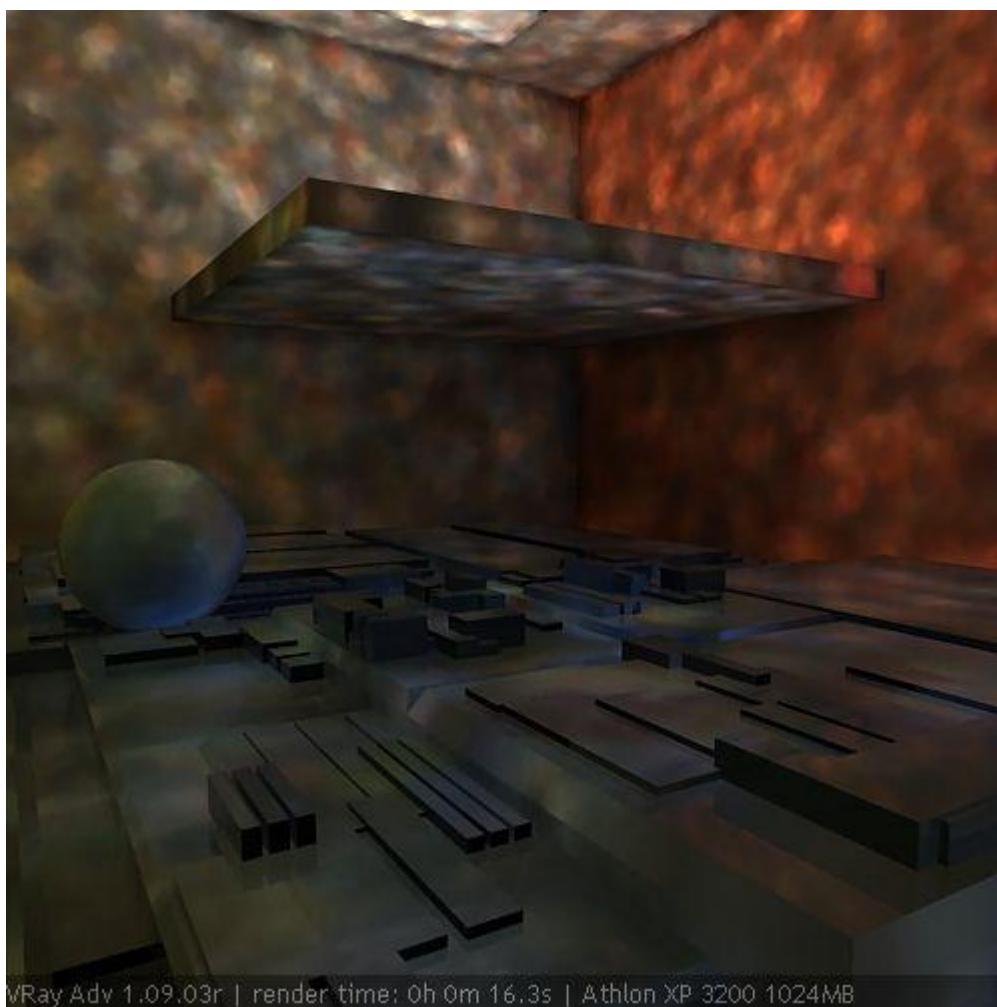


Рис.02-05f. Фотонная карта с включенным параметром Convert to irradiance map. Сравните с рис. 02-05b, рассчитанной без Convert to irradiance map.

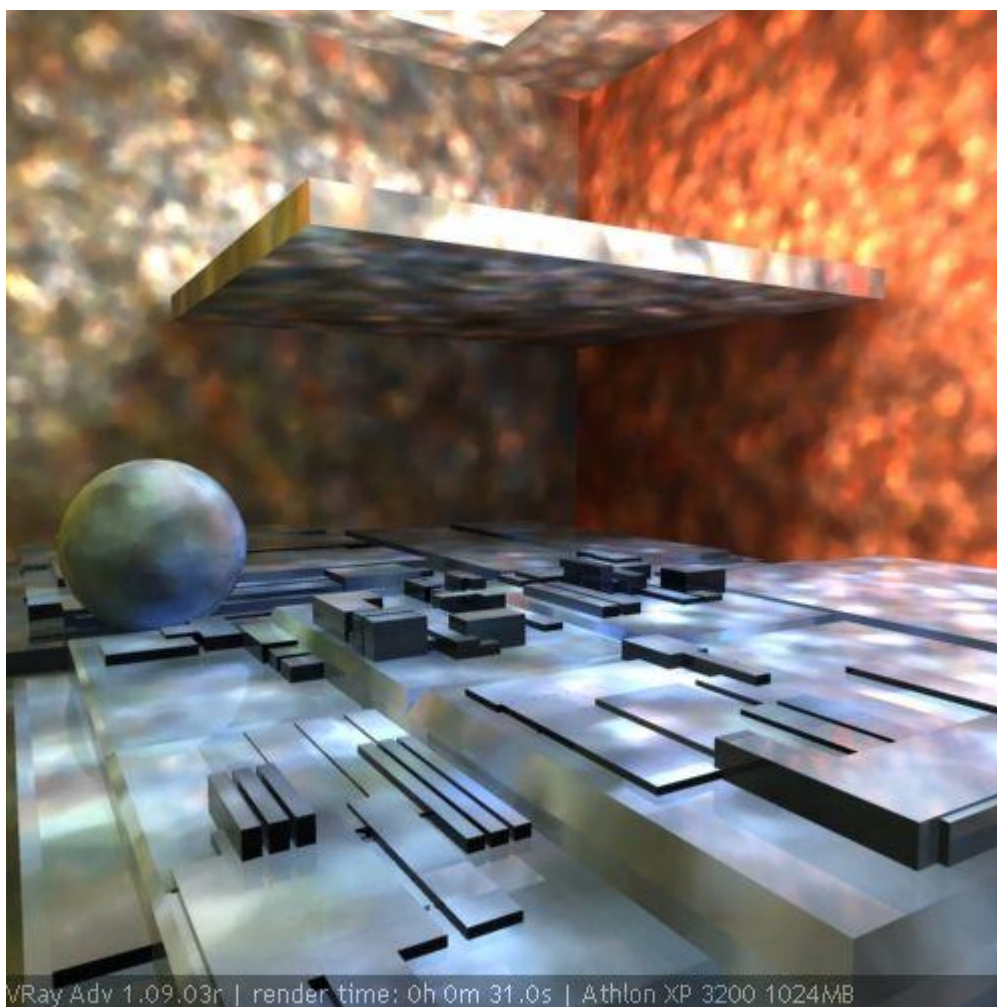


Рис.02-05h. Фотонная карта с Convex hull area estimate - on, Store direct light - on, Convert to irradiance map - on. Сравните с... думаю, вы уже знаете с чем :)

Для эффективного использования фотонной карты следует иметь ввиду следующие ее основные свойства:

1. ФК не зависит от положения камеры, от разрешения изображения и от настроек антиалиасинга. Это позволяет рассчитать фотонную карту требуемой плотности один раз, сохранить ее в файл и многократно использовать и настраивать без пересчета. Например, можно использовать для настройки фотонной карты изображение низкого разрешения с низким антиалиасингом. Пересчитывать фотонную карту не нужно при изменении положения камеры или при изменении разрешения изображения. И надо пересчитывать при любых других изменениях в сцене: свойств материалов и источников света, изменении геометрии или положения объектов - всего того, что меняет освещенность в сцене.
2. Параметры **Search dist.** и **Max. photons** можно менять без пересчета фотонной карты. Это позволяет посчитать фотонную карту с требуемой плотностью один раз, сохранить ее в файл, потом менять эти параметры и выполнять рендер с загрузкой фотонной карты из файла. Очень удобно для настройки фотонной карты. Почему это возможно - понятно, **Search dist.** и **Max. photons** всего лишь определяют количество фотонов для оценки освещенности и ничего не меняют в самой фотонной карте.
3. Количество излучаемых фотонов задается в свойствах источников света на закладке **VRay Systems>Lights settings** включением галочки **Generate diffuse** и указанием **Diffuse subdivs**. Максимальное количество излучаемых фотонов будет

определяться квадратом количества **subdivs**, а истинное - игрой пороговых параметров **QMC**. Для расчета фотонных карт необходимо также, чтобы в свойствах объектов **Object settings** той же закладки были выставлены галочки для **Generate GI** и **Receive GI**.

4. Фотонная карта может быть рассчитана только для материалов типа **VRay Mtl**. С другими типами материалов ФК не работает.

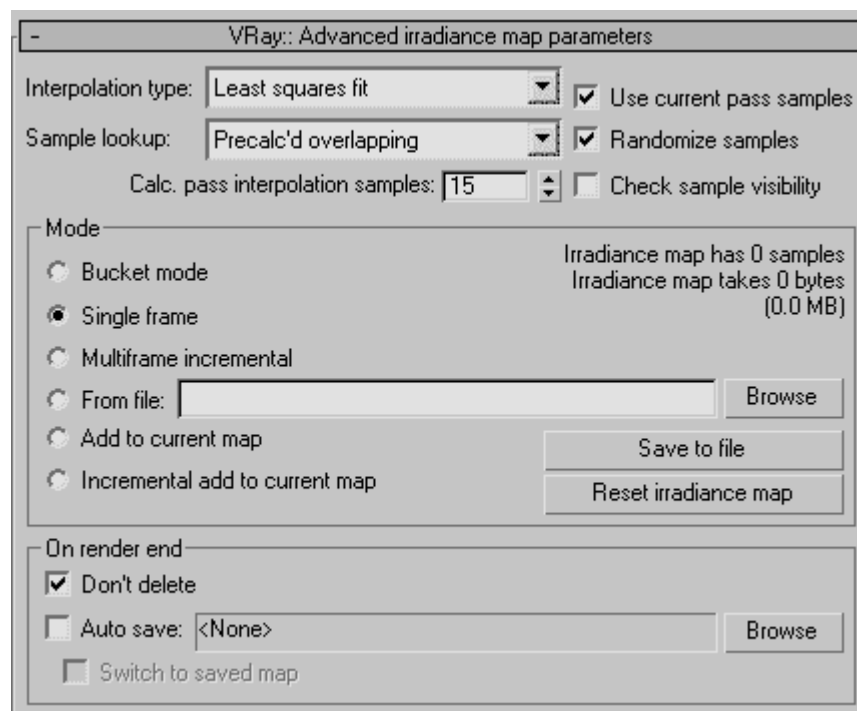
5. Фотонная карта не работает с источником света типа **SkyLight** и с **HDRI**. Расчет освещения от **SkyLight** и **HDRI** может быть выполнен только **irradiance map** или **direct computation**.

6. Фотонная карта в **VRay** предназначена только для расчета освещенности от многократных переотражений света, начиная со второго и выше. Она не предназначена для расчета первого диффузного отскока, то есть - освещенности от первого диффузного отражения. Наличие включения фотонной карты для расчета первого отскока закладки **VRay: Indirect Illumination** обусловлено только целями настройки самой фотонной карты.

7. Удивительно, но факт - величина **Bounces** фотонной карты незначительно влияет на количество взаимодействий фотонов с поверхностями (и на объем фотонной карты). Такая зависимость определенно должна быть сильнее - чем дольше прослеживается путь фотона, тем больше событий мы должны наблюдать. Возможно, сказывается влияние настроек **QMC Sampler**. Зато, как показывает практика, на объем фиксируемых в фотонной карте событий очень существенно влияет параметр **Multiplier** для **Secondary bounces** закладки **VRay: Indirect illumination (GI)**. Эти два свойства следует учитывать при планировании плотности фотонной карты.

8. Включение/отключение **Convex hull area estimate**, **Store direct light** и **Convert to irradiance map** требует пересчета фотонной карты.

Irradiance Map



Параметры настроек irradiance map

Interpolation type - способ интерполяции освещенности нерассчитываемых точек по освещенности рассчитанных. В самом простом случае освещенность точки интерполируется по рассчитанной освещенности ближайших точек в количестве,

указываемом в **Calc. Pass interpolation samples**. Освещенности суммируются с весовыми коэффициентами, зависящими от расстояния и направления нормалей. Имеется всего 4 типа интерполяции (4 разных способа вычисления весовых коэффициентов), из них три типа связаны с размытием - **Weighted average**, **Least squares fit**, **Least squares with Voronoi weights** и один тип без размытия - **Delone triangulation**. По умолчанию **VRay** использует **Least squares fit**, если нужен тип интерполяции без размытия - применяется **Delone triangulation**, что обеспечивает более точное и четкое изображение. Однако этот тип интерполяции требует увеличения количества **subdivs irradiance map**, поскольку из-за отсутствия размытия шум в изображении не сглаживается.

Sample lookup - способ выбора точек с рассчитанной освещенностью для интерполяции освещенности данной точки. Представлено три типа, самый простой - **Nearest**, подбирает подряд, все, что близко лежит к данной точке. Второй способ - **Nearest quad-balanced**, делит область вблизи точки на четыре части и пытается взять из каждой части одинаковое количество сэмплов, что часто приводит к использованию не самых лучших для интерполяции сэмплов (слишком удаленных). Третий способ требует дополнительного шага для предварительной обработки, но работает чуть ли не быстрее всех остальных - **Precalculated overlapping**. Требуется дополнительного расчета так называемых "радиусов влияния" для каждой рассчитанной освещенности. Такие радиусы влияния будут больше там, где плотность **irradiance map** меньше и наоборот. Затем, при рендере освещенность точки интерполируется только по тем точкам, в списках "радиусов влияния" которых имеется эта точка. Метод обеспечивает наивысшее качество.

Randomize samples - параметр, дополнительно влияющий на выбор точек на этапе расчета освещенности **direct computation**. Если галочка установлена, делает выбор не регулярно расположенные относительно друг друга точки, а так, чтобы обеспечить некоторую случайность их взаимного положения. Благотворно влияет на подавление некоторых видов алиасинга, в частности - муара.

Check sample visibility - при включении этого параметра интерполяция осуществляется с учетом взаимной видимости точек. Позволяет избежать "просачивания" света через тонкие стены.

В руководстве пользователя к **VRay** имеется галерея примеров, наглядно и достаточно полно демонстрирующая влияние каждого из вышеописанных параметров на **irradiance map** и конечное изображение. Рекомендую.

Mode - различные режимы использования **irradiance map**. **Bucket** полезен при сетевом рендеринге, поскольку для каждого **bucket** создается своя **irradiance map**. Требуется дополнительных расчетов (времени) для границ **bucket**, один из способов ускорить расчет - увеличивать размер **bucket**. **Single frame** - карта рассчитывается гораздо быстрее и сразу для всего изображения, но только при помощи одного компьютера. Остальные режимы предназначены для повторного использования рассчитанной **irradiance map** при изменении положения камеры (**Incremental add to current map**) или даже для анимации (**Multiframe incremental**) - карта будет считаться не целиком, а досчитывать только недостающие точки.

Несмотря на то, что **irradiance map** менее гибка, чем **photon map** и практически любое изменение настроек или параметров сцены требует ее пересчета, затраты могут быть минимизированы за счет различных режимов **Mode**. **Irradiance map** не нужно пересчитывать при изменении настроек **antialiasing** и при настройке **Color mapping**.

Что касается настроек пороговых величин для параметров отбора точек - **Clr. thresh**, **Nrm. Thresh** и **Dist. thresh**, то поскольку **VRay** использует некоторые абстрактные величины (**Generic units**) их значения довольно трудно связать с реальными единицами изменения цвета, углов нормалей или расстояний. Спасает только наличие **Irradiance**

map preset для рендеров с различными степенями качества. Выбрав из списка подходящий набор настроек, их можно использовать как отправную точку для собственных настроек пороговых величин.

Учитывая все вышесказанное, можно предложить следующий метод расчета освещенности трехмерной сцены при помощи **VRay**.

1. Постановка прямого освещения. Выбираются такие типы и количество источников света, чтобы они максимально соответствовали поставленным условиям, в частности - требованию реалистичности освещения. Затем, для света настраивается только прямое освещение регулированием настроек источников света - **multiplier, color** и других. На этом этапе все другие типы освещения (**GI**) отключаются. Правильно настроенное прямое освещение - залог хорошего рендера, поскольку именно прямое освещение является основным, определяющим.
2. Настройка и расчет фотонной карты с сохранением в файл.
3. Настройка и расчет **irradiance map** для **first diffuse bounce** совместно с подгружаемой из файла фотонной картой для **secondary bounces**. После настройки - сохранение рассчитанной **irradiance map** в файл.
4. Финальный рендеринг с тонкой настройкой светового баланса при помощи **VRay: Color mapping** и выбором необходимого уровня антиалиасинга. На этом этапе используется настроенная **irradiance map** из файла.

В следующей статье будет подробно рассмотрен пример настройки расчета освещенности конкретной сцены в соответствии с приведенной схемой.

До встречи!