

**И. А. Рыльский** (компания «Совзонд»)

В 2002 г. окончил географический факультет Московского государственного университета (МГУ) имени М. В. Ломоносова. Работал научным сотрудником лаборатории комплексного картографирования МГУ, старшим научным сотрудником Регионального центра мировой системы данных (МГУ), директором по развитию ЗАО «Арк-он». С 2015 г. — директор по науке и инновациям компании «Совзонд». Кандидат географических наук.

## Лазерное сканирование и космическая съемка — соревнование или партнерство

### ДАННЫЕ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ — ВОЗМОЖНОСТИ ПО ТОЧНОСТИ И ПОЛНОТЕ

В настоящее время наиболее совершенные съемочные системы космического базирования дают возможность получать снимки с детальностью 30 см (спутник WorldView-3). К сожалению, подобное разрешение сейчас есть только у одного аппарата. Основной же объем космической съемки предоставляет разрешение 50–60 см (рис. 1). Стоимость подобных данных в основной своей массе составляет около 20 долл./кв. км

(по сегодняшнему курсу — около 1500–1600 руб./кв. км).

Традиционно данные с разрешением 50 см позиционируются как материалы, пригодные для создания ортофотопланов масштаба 1:5000, и аналогичных по масштабу картографических материалов. При этом в большинстве случаев высотная погрешность у подобных данных близка к 1,5–2 пикселям, то есть составляет 75–100 см. Плановая погрешность при этом обычно находится на уровне 2–3 пикселей (при наличии качественной модели рельефа и опорных точек).

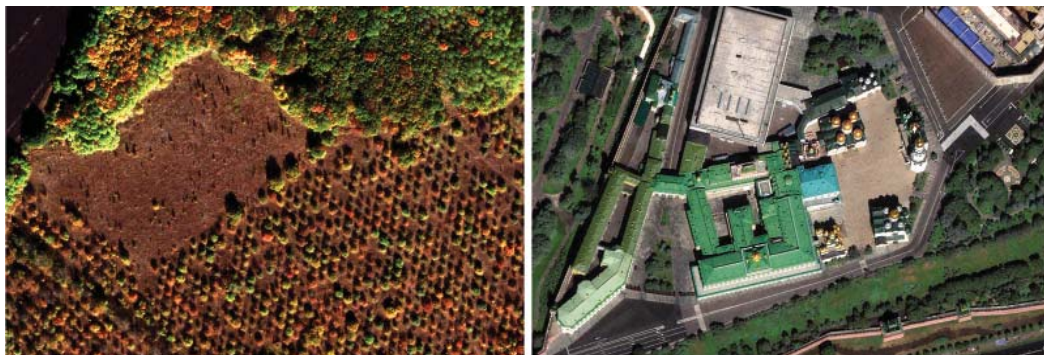


Рис. 1. Пример спутниковых данных с разрешением 30 см (WorldView-3, слева) и 50 см (WorldView-2, справа)

Если рассмотреть требования, скажем, к топографическим планам масштаба 1:5000 (согласно СНиП 11-02-96. «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения»), то можно отметить, что базовым сечением рельефа на материалах масштаба 1:5000 является 2 м, а точность высотных отметок должна составлять около 1/3 сечения рельефа, то есть 67 см. Плановая погрешность при этом может составлять до 2,5 м. Нетрудно видеть, что указанные материалы в целом пригодны для картографирования в 2D, но немного не дотягивают в точности по высоте до масштаба 1:5000.

Для данных космической съемки с разрешением 30 см, которые обычно позиционируются как достаточные для создания топографических планов масштаба 1:2000, ситуация аналогичная — требования в части точности рисовки контуров в плане (1 м) обеспечиваются, а в части определения высоты — немного не дотягивают до требований масштаба 1:2000 (согласно тому же СНиП 11-02-96). Так, высотная точность, которая может быть достигнута по данным с разрешением 30 см, составляет 45–60 см, а требуемая (при сечении рельефа в 1 м) — 33 см.

Кроме того, при работе в масштабах 1:2000 и 1:5000 требования в части рисовки рельефа начинают диктовать необходимость отображения мелких форм и микроформ рельефа (эрозионные врезы, откосы, бровки и др.). При этом кроны деревьев, несмотря на высокое разрешение, не становятся прозрачнее, и потому цифровая модель рельефа под кронами деревьев вообще перестает соответствовать каким-либо требованиям по точности — оператор-обработчик может только догадываться по формам крон об истинной форме рельефа под пологом растительности.

Таким образом, можно констатировать, что, несмотря на значительный прогресс в области детальности, данные сверхвысокого

разрешения, получаемые с систем космического базирования, имеют те же сложности в обработке, что и обычная аэрофотосъемка, при этом не обладая ее разрешающей способностью.

### **СУЩЕСТВУЮТ ЛИ БОЛЕЕ СОВЕРШЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В МАСШТАБАХ 1:2000 И 1:5000?**

Да, подобные решения существуют, они известны с начала 2000-х годов. Это технологии воздушного лазерного сканирования. Действительно, все системы воздушного лазерного сканирования оснащаются цифровыми фотокамерами среднего формата (иногда широкоформатными системами, работающими одновременно с системами сканирования), дающими цветные снимки. Лазерные импульсы способны как отражаться от крон деревьев, так и проникать сквозь незначительные отверстия в кронах до земли, давая исчерпывающую полную картину рельефа и микрорельефа (рис. 2). Точность лазерного сканирования (в плане и по высоте) на настоящий момент составляет до 5–8 см, что позволяет получать материалы масштаба от 1:5000 до 1:500 включительно.

По сравнению с классической аэрофотосъемкой у лазерного сканирования есть существенное преимущество в скорости обработки. Действительно, необходимость в выполнении фототриангуляции и восстановлении модели поверхности с использованием корреляционных или ручных стереоизмерений у лазерного сканирования отсутствует. Координаты объектов измеряются напрямую, в том числе в «колодцах» и стесненных объемах, на вертикальных стенах, проводах, висячих конструкциях и тому подобном, словом, на всех объектах, представляющих собой настоящий кошмар для фотограмметриста.



Рис. 2. Пример «пробивания» растительности по данным воздушного лазерного сканирования (переход р. Ангара, съемка в масштабе 1:2000, камера Riegl Q560)

Однако у систем лазерного сканирования есть и недостатки. По крайней мере, были. Вплоть до недавнего времени системы лазерного сканирования отличала небольшая высота съемки, резкое уменьшение плотности сканирования по мере увеличения высоты полета (и, как следствие, очень быстрое падение плотности сканирования), а также стоимость съемок. Собственно, стоимость съемок и являлась следствием первых двух причин. Кроме того, у систем воздушного сканирования с качающимся зеркалом (Leica, Optech) есть серьезные ограничения по возможности обеспечения равномерного покрытия лазерными точками, особенно при использовании их на скоростных носителях (вроде Ан-30, L-410). Системы с вращающимся зеркалом (Riegl) подобных ограничений не имеют.

Высокую стоимость самих лазерных систем нельзя рассматривать как априорный факт удорожания услуги. Действительно, стоимость широкоформатных аэрофотокамер не ниже, а порой в несколько раз выше стоимости системы воздушного лазерного сканирования. Комментарии про стоимость спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) излишни.

Однако начиная с 2014 года на рынке появились системы с чрезвычайно высокой производительностью, в которых проблема падения частоты сканирования с высотой

была практически решена (рис. 3). Это позволило «поднять» потолок сканирования при обеспечении заданной плотности в несколько раз. Примером подобной системы является камера Riegl Q1560. Благодаря граненому зеркалу данная система может обеспечивать равномерное распределение точек лазерных отражений в строке и между строками на всем диапазоне высот использования при скорости 180 км/ч и на высотах более 600 м — при скоростях до 350–450 км/ч.

### ПОЧЕМУ НАМ ЭТО ИНТЕРЕСНО

Анализ структуры заказов спутниковых данных, поставляемых компанией «Совзонд», начиная с 2007 года показывает рост объемов в области данных сверхвысокого разрешения. Восходящий тренд налицо. Интерес к данным с разрешением в 30 см на сегодня ограничивается только их ценой и длинной очередью желающих их приобрести (стоимость этих данных примерно в 2,5–3 раза выше стоимости данных с разрешением 50 см). Несмотря на известные плюсы космической съемки — огромную производительность, низкую стоимость минимального заказа, возможность быстрой покупки архивных данных, — у нее есть и минусы, которые все сильнее проявляются по мере увеличения объема заказа и разрешения снимков. Так, выполнение космической

съемки в объеме 2-3 тыс. кв. км с разрешением 30 см может занять несколько месяцев из-за большого количества заказчиков с более приоритетными и меньшими по объему съемки проектами. Съемка может вообще не состояться в районах с неустойчивой погодой — периодичность прохождения спутника над районом не может быть изменена.

В то же время авиационная лазерная съемка позволяет работать и под облаками, и использовать небольшие «окна» погоды, и не зависеть от большого числа ранее обратившихся заказчиков. Но самое главное — она сразу дает нам информацию о рельефе, по которой мы можем немедленно приступить к ортотрансформированию снимков, а также предложить клиенту целую линейку новых продуктов, которые нельзя получить, используя обычную аэрофото- или космическую съемку. Эти продукты:

- Цифровая модель рельефа с беспрецедентной детальностью и 100% покрытием

(несмотря на лес).

- Цифровая модель относительных высот надземных объектов — домов, столбов.

- Системы трехмерных профилей объектов и рельефа.

Как видим, высокопроизводительная лазерная съемка с одновременной фото-съемкой может создать неплохую альтернативу космической съемке, а именно ее наиболее массовому сегменту с разрешением 50 см.

В данном случае вопрос заключается в цене. Используя открытые сведения о тактико-технических характеристиках двух наиболее производительных на сегодняшний день систем (Riegl Q1560, Optech GALAXY), мы сделали ряд простых вычислений, в том числе ценовых. Остальные системы не упоминаются в данной работе ввиду либо их существенно меньшей производительности, либо из-за невозможности работать на высотах 2,5 тыс. м и более.

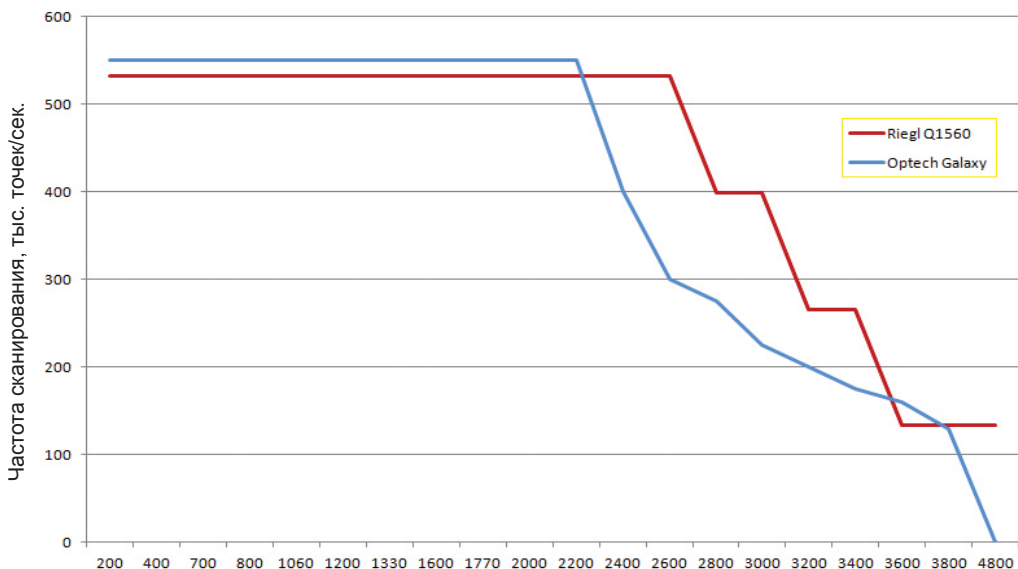


Рис. 3. Уменьшение частоты сканирования с высотой у Riegl Q1560 и OPTECH GALAXY

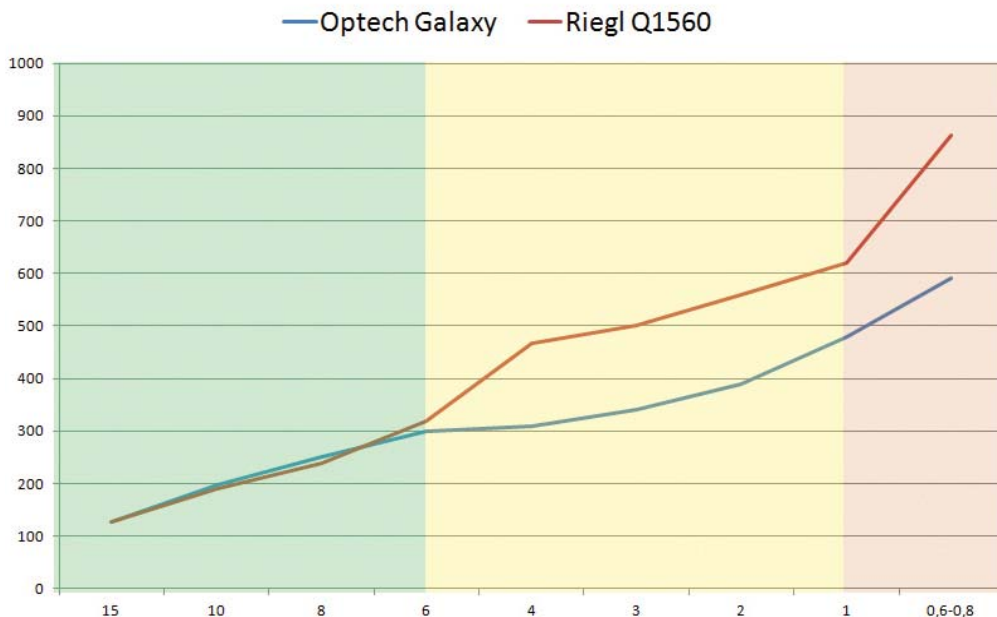


Рис. 4. Производительность лазерной съемки с использованием камер Riegl Q1560 и OPTECH GALAXY. Приведены данные для АН-2 (прямолетный полет) при работах под заданную плотность сканирования (или масштаб)

## ИСХОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАСЧЕТОВ

При расчетах условий использования системы мы исходили из работы по объектам, обладающим отражающей способностью на уровне темнохвойных лесов. Это было сделано для обеспечения реалистичности расчетов (альbedo 40%). Поскольку упоминающиеся в данной статье лидары работают на одинаковой длине волны, поправки в альbedo за длины волн не требуются. В расчетах производительности постулируется, что только 40% летного времени производится съемка новых территорий. Остальные 60% налета уходят в подлет, развороты, обеспечение перекрытия. При расчете итоговой ожидаемой «коммерческой себестоимости» мы исходили из того, что авиационные работы составляют лишь 40% затрат на проект, все остальное является амортизацией оборудования, затратами на

зарплату, командировки и тому подобное.

Материалы взяты из официальных характеристик приборов:

- для Optech — <http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/Galaxy-Specsheet-150402-WEB.pdf>
- для Riegl — [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/DataSheet\\_LMS-Q1560\\_2015-03-19.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_LMS-Q1560_2015-03-19.pdf)

На практике возможно много вариантов носителей для данных систем. Мы выбрали наиболее типичных представителей: АН-2 (обычно применяется для лазерного сканирования, очень распространен) и АН-30 — классический пример носителя для высокопроизводительной аэрофотосъемочной системы. В расчетах использованы цены на летный час работ, взятые с некоторым запасом (возможность нанять самолеты дешевле существует, но цена зависит также и от региона).

Как следует из рис. 4, в масштабах, которые сейчас наиболее интересны клиентам компании «Совзонд» (1:2000, 1:5000), камера Riegl Q1560 обладает полуторократным преимуществом по реальной производительности. Очевидно, что если для компании ключевой является цена, определяемая себестоимостью работ, то производительность — ключевой фактор выбора. Именно поэтому во всех дальнейших расчетах используются тактико-технические характеристики камеры Riegl Q1560.

Нетрудно видеть на рис. 3, что до высоты 2,5 тыс. м частота сканирования Riegl Q1560 не падает, а остается максимальной. Это достигается за счет технологии МТА, позволяющей в постобработке разрешать

неоднозначность, возникающую при нахождении в воздухе нескольких лазерных импульсов одновременно (поддерживается до 10 импульсов). Высокая мощность лазера позволяет иметь большой запас по высоте, до которой нет необходимости снижать частоту сканирования (рис. 5).

Камера комплектуется 80-мегапиксельным задником, и может дополняться различными объективами. В основном фокусное расстояние составляет примерно 10 300 пикселей. Нетрудно видеть, что вплоть до высоты 4 тыс. м разрешение камеры так и не достигает 50 см, оставаясь на уровне 40 см на высоте 4 тыс. м (рис. 6). На высотах выше 800 м перекрывается весь диапазон масштабов 1:1000-1:5000.

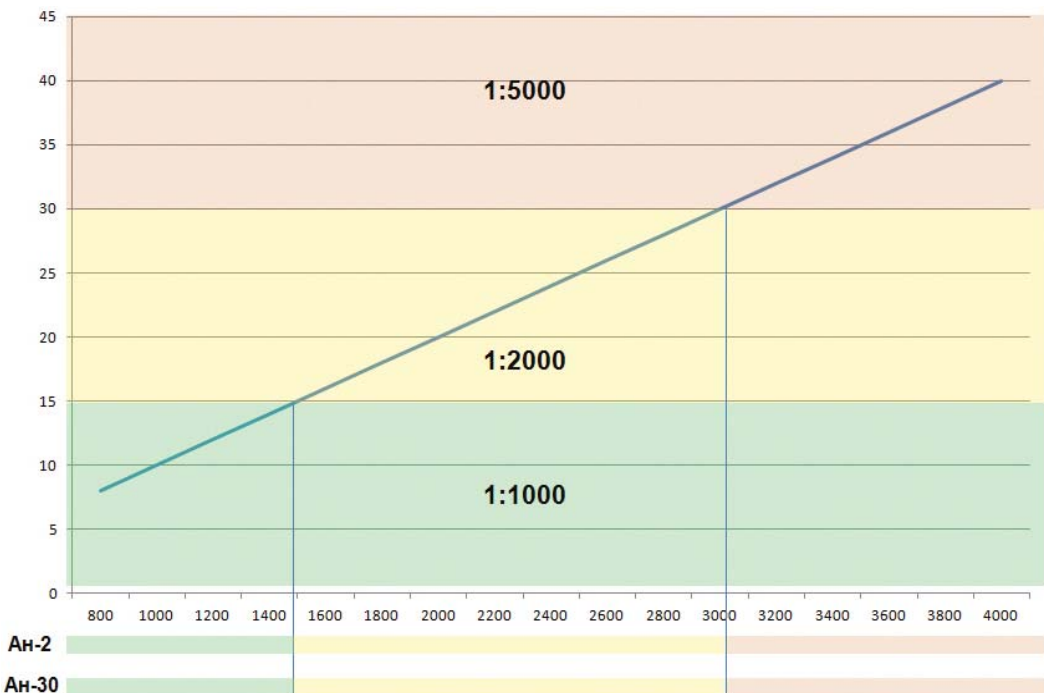


Рис. 5. Разрешение фотоснимков, получаемых при использовании штатной среднеформатной камеры Riegl Q1560. Ось X — высота в м, ось Y — разрешение фотоснимка в см

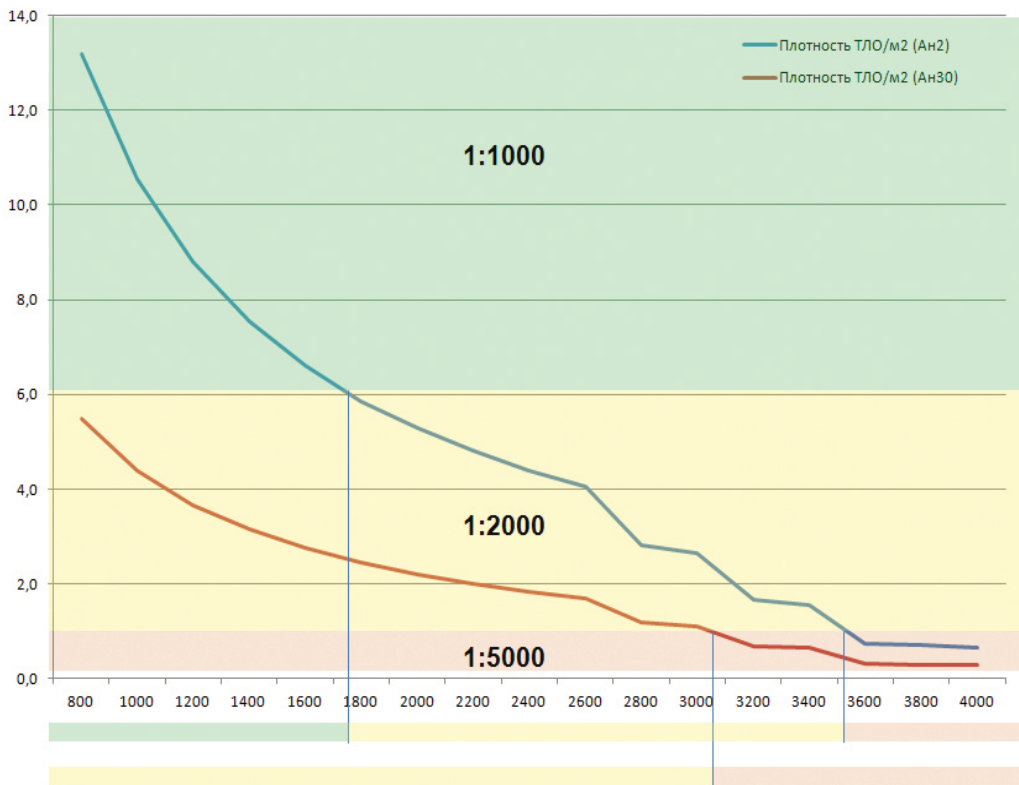


Рис. 6. Плотность точек лазерного сканирования, получаемая с использованием камеры Riegl Q1560 на различных носителях. Ось X — высота в м, ось Y — количество точек на 1 кв. м

Плотность точек лазерного сканирования на земле напрямую зависит от скорости носителя. При использовании Ан-2 возможно обеспечение плотностей в диапазоне 1:1000–1:5000 при работе на высотах более 800 м. С Ан-30 на аналогичных высотах достигается плотность, достаточная для масштаба 1:2000–1:5000.

В табл. 1, 2 можно ознакомиться с конкретными значениями производительности, скорости полета, высоты, частоты, разрешающей способности и стоимости выполнения работ — летных затрат и ожидаемой коммерческой себестоимости. Значения

рассчитаны по приведенной выше методике.

График (рис. 7) показывает, что при использовании системы Riegl Q1560 и подборе носителя под задачу возможно выполнение съемок под масштаб 1:1000 по цене от 1400 руб./кв. км, под масштаб 1:2000 — от 750 руб./кв. км, под масштаб 1:5000 — от 650 руб./кв. км. Сравнивая эти цены со стоимостью уже упоминавшихся космических данных по цене 1500 руб./кв. км, которые все равно не позволяют сделать полноценный план масштаба 1:2000 или 1:5000, можно сделать вывод, что применение подобной

Высота сканирования	Частота эффективная	Частота ТЛО/м2	Сред. Расст. между ТЛО, см	Разрешение фотоснимков, см	Соответствует масштабу	Производительность, в летный час, км2*	Производительность при КПД съемки в 40%	Себестоимость, рублей/км2 (в части летных работ)	Ожидаемая коммерческая стоимость, руб/км2	
200	800	528	52,8	14	2	500	36	14	4 861	12 153
400	800	528	26,4	19	4	500	72	29	2 431	6 076
600	800	528	17,6	24	6	500	108	43	1 620	4 051
800	800	528	13,2	28	8	1 000	144	58	1 215	3 038
1000	800	528	10,6	31	10	1 000	180	72	972	2 431
1200	800	528	8,8	34	12	1 000	216	86	810	2 025
1400	800	528	7,5	36	14	1 000	252	101	694	1 736
1600	800	528	6,6	39	16	2 000	288	115	608	1 519
1800	800	528	5,9	41	18	2 000	324	130	540	1 350
2000	800	528	5,3	44	20	2 000	360	144	486	1 215
2200	800	528	4,8	46	22	2 000	396	158	442	1 105
2400	800	528	4,4	48	24	2 000	432	173	405	1 013
2600	800	528	4,1	50	26	2 000	468	187	374	935
2800	600	396	2,8	59	28	2 000	504	202	347	868
3000	600	396	2,6	62	30	2 000	540	216	324	810
3200	400	264	1,7	78	32	5 000	576	230	304	760
3400	400	264	1,6	80	34	5 000	612	245	286	715
3600	200	132	0,7	117	36	5 000	648	259	270	675
3800	200	132	0,7	120	38	5 000	684	274	256	640
4000	200	132	0,7	123	40	5 000	720	288	243	608

Табл. 1. Режимы работы камеры Riegl Q1560 при съемке с Ан-2. Цветом показаны режимы в соответствии с масштабом (зеленый —1:1000, желтый — 1:2000, оранжевый —1:5000)

Высота сканирования	Частота эффективная	Частота ТЛО/м2	Сред. Расст. между ТЛО, см	Разрешение фотоснимков, см	Соответствует масштабу	Производительность, в летный час, км2*	Производительность при КПД съемки в 40%	Себестоимость, рублей/км2 (в части летных работ)	Ожидаемая коммерческая стоимость, руб/км2	
200	800	528	52,8	14	2	500	36	14	4 861	12 153
400	800	528	26,4	19	4	500	72	29	2 431	6 076
600	800	528	17,6	24	6	500	108	43	1 620	4 051
800	800	528	13,2	28	8	1 000	144	58	1 215	3 038
1000	800	528	10,6	31	10	1 000	180	72	972	2 431
1200	800	528	8,8	34	12	1 000	216	86	810	2 025
1400	800	528	7,5	36	14	1 000	252	101	694	1 736
1600	800	528	6,6	39	16	2 000	288	115	608	1 519
1800	800	528	5,9	41	18	2 000	324	130	540	1 350
2000	800	528	5,3	44	20	2 000	360	144	486	1 215
2200	800	528	4,8	46	22	2 000	396	158	442	1 105
2400	800	528	4,4	48	24	2 000	432	173	405	1 013
2600	800	528	4,1	50	26	2 000	468	187	374	935
2800	600	396	2,8	59	28	2 000	504	202	347	868
3000	600	396	2,6	62	30	2 000	540	216	324	810
3200	400	264	1,7	78	32	5 000	576	230	304	760
3400	400	264	1,6	80	34	5 000	612	245	286	715
3600	200	132	0,7	117	36	5 000	648	259	270	675
3800	200	132	0,7	120	38	5 000	684	274	256	640
4000	200	132	0,7	123	40	5 000	720	288	243	608

Табл. 2. Режимы работы Riegl Q1560 при съемке с Ан-30. Цветом показаны режимы в соответствии с масштабом (зеленый —1:1000, желтый — 1:2000, оранжевый —1:5000)



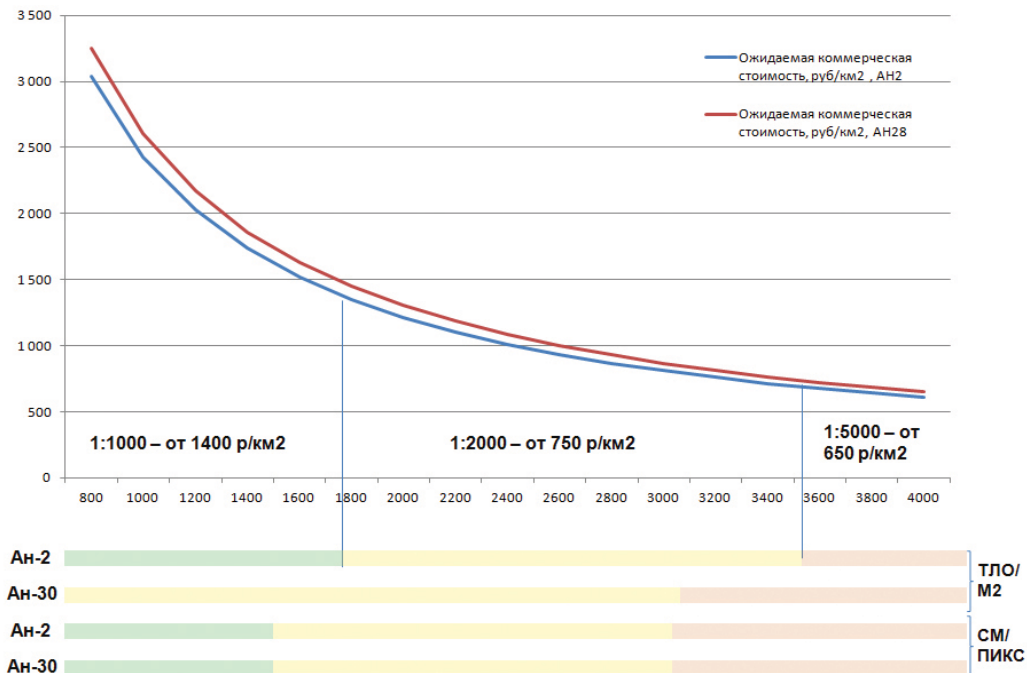


Рис. 7. Ожидаемая стоимость работ при использовании Riegl Q1560 на различных носителях под различных масштабах

системы на российском рынке способно потеснить позиции западных поставщиков космических данных.

В приведенных ценах не учтены затраты на плано-высотное обоснование, создание ортофотопланов, создание цифровых моделей рельефа (в стоимости поставки спутниковых данных они тоже не учтены). Не учтена перегонка борта до места работ — на малых проектах она может существенно удорожать выполнение работ. Есть также ряд иных допущений, однако общий итог говорит об одном — применение высокопроизводительных лазерных систем, которые могут обеспечить работу в режиме частоты сканирования выше 500 тыс. точек/сек. на высотах более 2 тыс. м и равномерность распределения точек отражений на больших

скоростях, приведет к снижению затрат на получение данных дистанционного зондирования до уровня массово доступных данных космосъемки с разрешением 50 см.

В настоящее время система с такими характеристиками всего одна — уже упоминавшийся Riegl Q1560. К сожалению, другие производители (Leica и Ortech) не предлагают решений, обеспечивающих подобную производительность и равномерное распределение данных на больших высотах. Следовательно, эти производители не достигают подобной ценовой эффективности. В настоящее время компания «Совзонд» рассматривает возможность частичной замены данных космических съемок с использованием подобной системы.

# ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ — новый уровень детальности

Компания «Совзонд» все активнее использует технологии воздушного, наземного и мобильного лазерного сканирования в практике информационного обеспечения проектов и предоставляет своим заказчикам всю линейку продуктов — от высокдетальных 3D-моделей объектов масштаба 1:50 до топографических планов масштаба 1:500–1:5000 включительно (по технологии, включающей совместное проведение воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки).

Образцы облаков точек, полученных в результате лазерного сканирования для построения 3D-моделей, представлены на рисунках.



