

## Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности

В.А. Егоров, С.А. Барталев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: egorov@d902.iki.rssi.ru*

Применение методов дистанционного зондирования для картографирования и мониторинга растительного покрова в регионах с выраженным рельефом местности сопряжено с необходимостью учета вносимых им радиометрических искажений в данные измерений характеристик отраженного земной поверхностью излучения. Возрастающая под влиянием рельефа местности внутриклассовая изменчивость значений спектральной яркости объектов земной поверхности служит дополнительным источником ошибок, приводя, как правило, к снижению точности распознавания типов растительного покрова, выявления изменений его состояния и оценки количественных характеристик. Целью топографической нормализации является преобразование дистанционно измеренных значений спектральной яркости наклонных участков земной поверхности в потенциально присущие им при горизонтально плоском положении величины, с тем чтобы снизить вызванную различиями ориентации и крутизны склонов вариабельность отражательных характеристик однотипных объектов. В работе исследовано влияние геометрии освещения покрытой лесом территории на оптимальные значения параметров модели Миннаерта и предложен новый метод топографической нормализации спутниковый изображений, основанный на адаптивном выборе параметров модели в зависимости от крутизны склона. Представлены результаты исследований по оценке эффективности предложенного метода применительно к данным спутниковой системы ДЗЗ Proba-V на территорию Приморского края.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радиометрическая коррекция влияния рельефа, модель Миннаерта, Proba-V

*Одобрена к печати: 19.10.2016*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-192-201*

### Введение

Применение методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для картографирования и мониторинга растительного покрова в регионах с выраженным рельефом местности сопряжено с необходимостью учета вносимых им радиометрических искажений в данные измерений характеристик отраженного земной поверхностью излучения. Возрастающая под влиянием рельефа местности внутриклассовая изменчивость значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) объектов земной поверхности служит дополнительным источником ошибок, приводя, как правило, к снижению точности распознавания типов растительного покрова, выявления изменений его состояния и оценки количественных характеристик.

Возможные методические пути учета такого рода радиометрических искажений в данных ДЗЗ часто сопряжены с использованием двух различных подходов, а именно:

- стратификация территории с выделением относительно однородных по характеристикам рельефа местности (азимут и крутизна склона) участков с последующей независимой обработкой данных ДЗЗ в пределах каждой из множества выделенной страт;
- радиометрическая коррекция данных ДЗЗ с выраженным влиянием рельефа местности (часто называемая топографической нормализацией) с использованием математических моделей, описывающих искажения в данных измерений отраженного излучения

ния в виде функций характеристик рельефа, геометрических условий освещения и наблюдения земной поверхности.

Топографическая нормализация является одним из важных этапов предварительной обработки спутниковых изображений. Она часто применяется в сочетании с другими видами радиометрической коррекции, которые направлены на компенсацию эффектов, вызванных изменениями геометрических условий освещения и наблюдения земной поверхности, анизотропностью отражения ею излучения, пространственной неоднородностью его рассеяния и поглощения атмосферой, а также некоторыми другими факторами. При этом проведение атмосферной коррекции с использованием таких методов, как, например, 6S (Vermote et al., 1997), или DOS (Dark Object Subtraction; Chavez, 1996), исходят из предположения горизонтально плоской земной поверхности.

Целью топографической нормализации является преобразование дистанционно измеренных значений КСЯ наклонных участков земной поверхности в потенциально присутствующие им при горизонтально плоском положении величины, с тем чтобы снизить вызванную различиями ориентации и крутизны склонов вариабельность отражательных характеристик однотипных объектов (Gao, Zhang, 2008a). К настоящему времени предложено и описано в научной литературе множество методов топографической нормализации данных ДЗЗ, основанных на различных моделях.

В начале 1980-х годов, была предложена модель Cosine (Teillet et al., 1982), впоследствии улучшенная и положенная в основу разработки алгоритма, получившего известность как модель топографической нормализации C (Gao, Zhang, 2008b; Huang et al., 2005). Вместе с тем, в силу предположения о ламбертовском характере отражения излучения земной поверхностью, лежащего в основе модели C, она имеет весьма ограниченную область своего корректного применения, внося значительные ошибки в результаты восстановления КСЯ отдельных участков. Предложенная в дальнейшем модель SCS (Sun-Canopy-Sensor) (Gu, Gillespie et al., 1998) и ее модифицированная версия SCS + C (Soenen et al., 2005), используют настроечный параметр C, введенный для улучшения описания взаимосвязей между типами растительного покрова и отраженным излучением.

Принципиально новый этап развития методов топографической нормализации данных ДЗЗ, стимулируемый стремлением преодолеть ограничения, порожденные допущением ламбертовского характера отраженного земной поверхностью излучения, связан в разработкой модели Миннаерта (Smith et al., 1980). Модель Миннаерта рассматривает зондируемую поверхность в качестве неламбертовского отражателя излучения, а введенная в нее эмпирическая константа K зависит от типа земного покрова, крутизны склона и длины волны. Однако, несмотря на общее заметное улучшение результатов, получаемых с использованием модели Миннаерта, на территориях с высокими значениями зенитного угла Солнца топографическая нормализация при постоянной величине K может приводить к эффектам гиперкоррекции. Упрощение модели с включением в нее используемых в алгоритме SCS подходов привело к созданию модели топографической нормализации Minnaert + SCS (Reeder, 2002).

Вместе с тем сравнительные исследования различных моделей топографической нормализации данных ДЗЗ показывают (Stijn et al., 2011), что результаты использования какого-либо подхода для коррекции одномоментного спутникового изображения могут быть максимально приближены к идеальным. Однако для серии наблюдений изменения, связанные с геометрией освещения, могут снизить эффективность топографической нормализации.

Известные в настоящее время модели топографической нормализации, опирающиеся на использование цифровой модели рельефа, можно условно классифицировать следующим образом:

- эмпирико-статистические модели (Teillet et al., 1982; Vincini et al., 2002);
- ламбертовские модели (Civco, 1989; Dymond et al., 1999);
- неламбертовские модели (Smith et al., 1980; Ekstrand, 1996).

Некоторые ламбертовские и неламбертовские модели топографической нормализации представлены в *табл. 1* (Gao et al., 2014). Эти методы могут быть применены как к измеренным на верхней границе атмосферы, так и к приведенным к уровню земной поверхности (атмосферно скорректированным) данным КСЯ.

Таблица 1. Модели топографической нормализации данных ДЗЗ

	<i>Название модели</i>	<i>Модель</i>	<i>Автор</i>
1	Cosine	$R_n = R \cdot (\cos(\theta_s) / \cos(i))$	Teillet et al. (1982)
2	C-HuangWei	$R_n = (R - R_{\min}) \cdot \left( \frac{\cos(\theta_s) - \cos(i)_{\min}}{\cos(i) - \cos(i)_{\min}} \right) + R_{\min}$	Huang et al. (2005)
3	SCS+C	$R_n = R \cdot \left( \frac{\cos(\theta_s) \cdot \cos(S) + C}{\cos(i) + C} \right)$	Soenen et al. (2005)
4	Minnaert	$R_n = R \cdot \left( \frac{\cos(e)}{\cos^K(i) \cdot \cos^K(e)} \right)$	Smith et al. (1980)
5	Minnaert+ SCS	$R_n = R \cdot \left( \frac{\cos^K(\theta_s) \cdot \cos(S)}{\cos^K(i)} \right)$	Reeder (2002)

В приведенных в *табл. 1* математических выражениях приняты следующие обозначения:  $R_n$  – приведенное к горизонтальной поверхности значение КСЯ;  $R$  – измеренное значение КСЯ;  $R_{\min}$  – минимальное значение КСЯ на рассматриваемой территории;  $\theta_s$  – зенитный угол Солнца;  $S$  – угол наклона (крутизна) склона;  $i$  – угол падения солнечного излучения;  $e$  – угол между направлением на сенсор и нормалью к земной поверхности в наблюдаемой точке;  $\theta_v$  – зенитный угол наблюдения ( $e = S$  при  $\theta_v = 0$ );  $C$  – эмпирическая константа;  $K$  – коэффициент Миннаерта.

Величина  $\cos(i)$  может быть вычислена как:

$$\cos(i) = \cos(\theta_s) \cdot \cos(S) + \sin(\theta_s) \cdot \sin(S) \cdot \cos(\phi_s - A), \quad (1)$$

где  $\phi_s$  – азимутальный угол Солнца,  $A$  – ориентация склона.

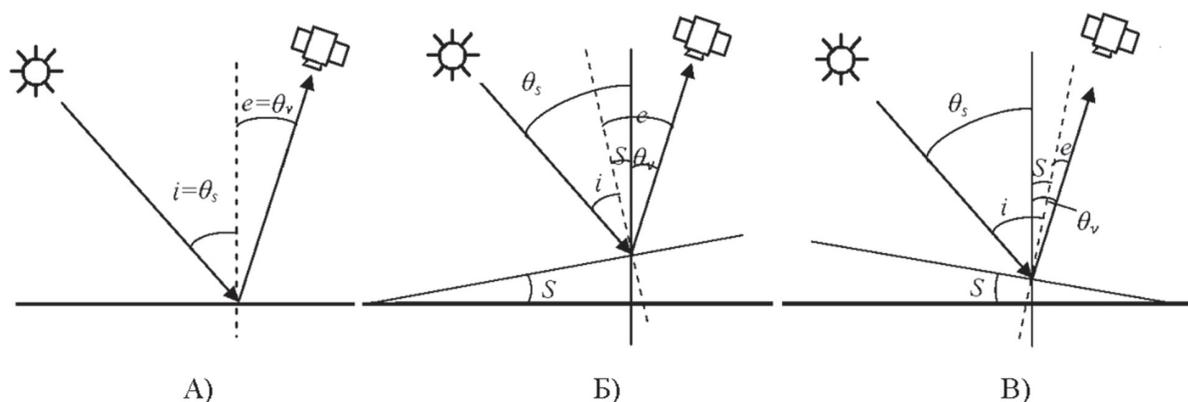


Рис. 1. Геометрическая модель Солнце-поверхность-сенсор (Gao et al., 2014). А) – горизонтальная поверхность; Б) и В) – варианты ориентации склона, в зависимости от которых величина  $e$  равна либо сумме  $S$  и  $\theta_v$ , либо их разности

### Метод топографической нормализации данных ДЗЗ

Наиболее широко используемая для топографической нормализации данных ДЗЗ модель Миннаерта учитывает неламбертовский характер отражения поверхности с использованием эмпирической константы  $K$ , настраиваемой для различных типов земного покрова. Значения  $K$  меняются в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от типа земного покрова и длины волны излучения. При  $K=1$  наблюдаемая поверхность соответствует отражателю ламбертовского типа.

Оценка оптимального значения эмпирической константы  $K$  может быть получена путем построения для заданного типа земного покрова уравнения линейной регрессии, основанного на следующем преобразовании модели Миннаерта:

$$R \cdot \cos(e) = R_n \cdot \cos^K(i) \cdot \cos^K(e). \quad (2)$$

Логарифмируя обе части уравнения (2), приходим к следующему выражению:

$$\ln(R \cdot \cos(e)) = \ln(R_n) + K \cdot \ln(\cos(i) \cdot \cos(e)). \quad (3)$$

Введя обозначения  $X = \ln(\cos(i) \cdot \cos(e))$ ,  $Y = \ln(R \cdot \cos(e))$  и  $B = \ln(R_n)$ , запишем уравнение (3) в виде:

$$Y = K \cdot X + B. \quad (4)$$

Таким образом, оценка оптимальной величины  $K$  может быть получена на основе поиска наилучшей линейной аппроксимации входящих в выражения (3) значений.

В результате топографической нормализации данных ДЗЗ ожидается, в частности, минимизация различий между изображениями участков затененных и освещенных склонов, а также горизонтально-ровной земной поверхности. Описанный выше метод оценки коэффициента Миннаерта  $K$  может быть успешно применен к многоканальным (в общем случае) изображениям, свободным от влияния облачности и других мешающих факторов, не связанных непосредственно с земной поверхностью. Однако часто имеющая место подверженность оптических спутниковых наблюдений влиянию облаков затрудняет построение уравнения регрессии (4) и требует проведения предварительной фильтрации исходных данных ДЗЗ. В этой связи для оценки величины  $K$  представляется целесообразным использование предварительно очищенных от влияния облаков данных, что может быть достигнуто построением так называемых композитных спутниковых изображений, сформированных на основе множества спутниковых наблюдений за заданный временной интервал (Барталев и др., 2004). Исключая зашумленные участки изображений на основе некоторой независимо применяемой процедуры предварительной обработки данных ДЗЗ (описание процедуры выходит за рамки настоящей статьи, но аналогично (Барталев, Егоров, Лупян и др., 2011) и анализируя геометрические условия освещения земной поверхности, можно оценить средние значения КСЯ освещенных  $M_s$ -склонов и затененных  $M_n$ -склонов, характеризуемых однотипным земным покровом. Соотношение  $R(M_n)/R(M_s)$  в каждом спектральном канале изображения можно рассматривать как функцию, параметрами которой является длина волны, величина коэффициента Миннаерта  $K$ , использованная для нормализации изображений, и крутизна склона. Варьируя значения величины  $K$  и рассматривая отдельно участки в некоторых диапазонах величин крутизны склонов, можно получить такое значение  $K$ , при котором для данных длины волны и крутизны склона соотношение  $R(M_n)/R(M_s)$  будет стремиться к единице. Оптимальное значение  $K$  соответствует  $R(M_n)/R(M_s) = 1$ . При этом следует отметить, что в летний период дистанционных наблюдений при относительно небольших значениях зенитного угла Солнца крутизна склона оказывает слабое влияние на выбор величины  $K$  (Lu et al., 2008).

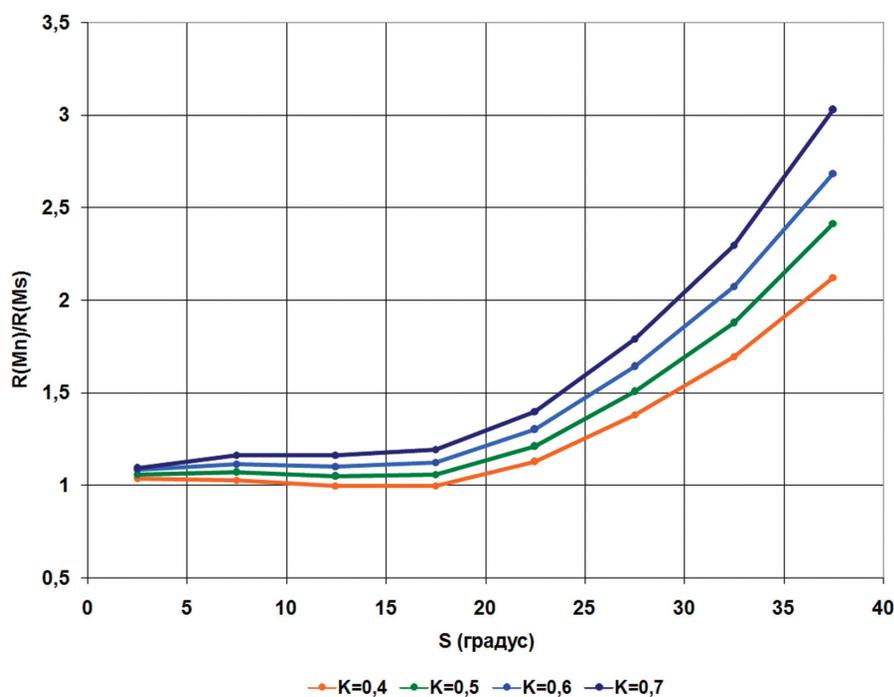
## Результаты

Метод радиометрической коррекции влияния рельефа местности, предложенный выше, был апробирован на данных спутниковой системы ДЗЗ Proba-V с пространственным разрешением 115 м, полученных на территории Приморского края в период с марта 2014 года по март 2016 года. Система Proba-V обладает четырьмя спектральными каналами: голубой (0,447–0,493 мкм), красный (0,61–0,69 мкм), NIR (0,777–0,893 мкм) и SWIR (0,157–0,165 мкм). В качестве цифровой модели рельефа были использованы данные SRTM, деградированные до уровня пространственного разрешения данных Proba-V. Настройка

модели проводилась по участкам хвойных и смешанных лесов в соответствии с картой растительного покрова России (Барталев, Егоров, Ершов и др., 2011; Барталев и др., 2015).

Для нормализации данных, полученных в условиях свободной от снежного покрова земной поверхности, описанным выше методом были получены фиксированные оценки значений  $K$  для красного, NIR и SWIR спектральных каналов.

В зимний период наблюдений, при наличии снежного покрова на земной поверхности и высоких значениях зенитного угла Солнца, было отмечено, что на выбор оптимального значения  $K$  сильное влияние оказывает величина крутизны склона. На *рис. 2* представлена зависимость  $R(M_n)/R(M_s)$  для красного канала Proba-V от крутизны склона при нескольких фиксированных значениях  $K$ . Построив зависимость соотношения  $R(M_n)/R(M_s)$  от величины  $K$  при фиксированной крутизне склона (*рис. 3*), возможно оценить оптимальное значение  $K$ , при котором  $R(M_n)/R(M_s) = 1$ . В данном случае указанная выше взаимосвязь имеет линейный вид.



*Рис. 2. Зависимость соотношения  $R(M_n)/R(M_s)$  от крутизны склона при различных значениях коэффициента Миннаерта для красного канала Proba-V*

Исследование полученных функций позволяет построить зависимость оптимального значения коэффициента Миннаерта от крутизны склона (*рис. 4*) для выбранного спектрального канала. При этом в зимний период наблюдений, при наличии снежного покрова на земной поверхности, наибольшей информативностью характеризуются данные Proba-V в красном и NIR спектральных каналах. Следует отметить, что метод определения этой зависимости основан на предположении, что затененные и освещенные участки склонов близкой крутизны характеризуются и сходными по характеристикам типами земного покрова. Однако в определенных условиях могут проявляться факторы, вызывающие откло-

нение установленных зависимостей от ожидаемого вида. В частности, такое отклонение может иметь место в условиях покрытой снегом земной поверхности за счет возрастания вклада переотраженного соседними склонами излучения или появления вызванных наличием снежного покрова отклонений фактического (на момент наблюдений) рельефа подстилающей поверхности от описывающей его цифровой модели.

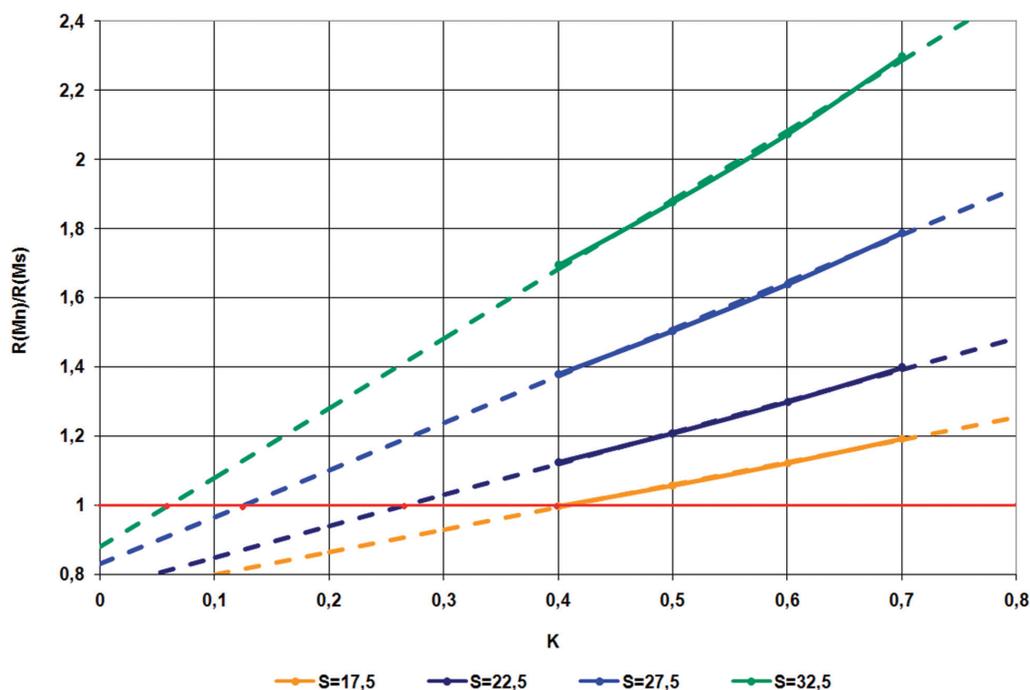


Рис. 3. Зависимость соотношения  $R(M_n)/R(M_s)$  от коэффициента Миннаерта при различной крутизне склонов для красного канала Proba-V (сплошные линии построены по экспериментально измеренным значениям, пунктирной линией показана экстраполяция функций до пересечения с линией  $R(M_n)/R(M_s) = 1$ )

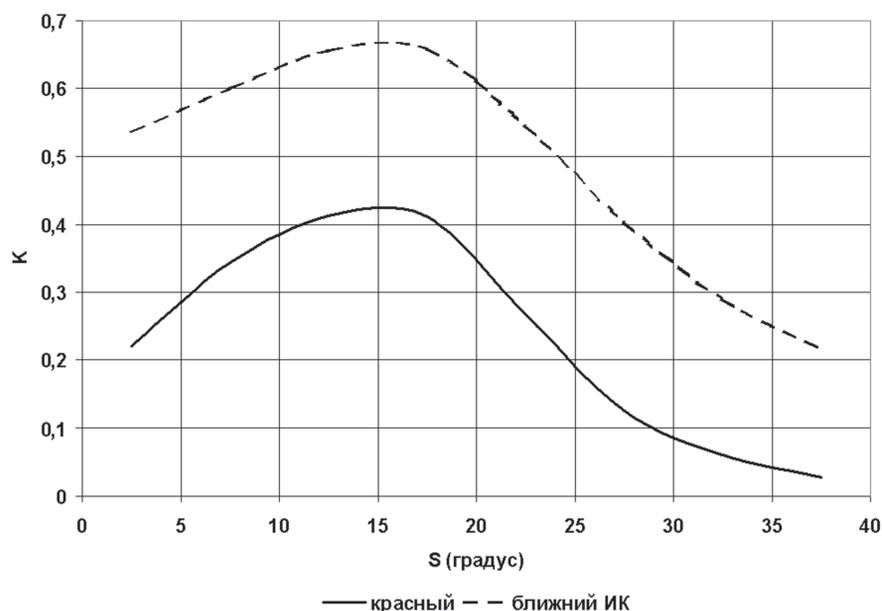
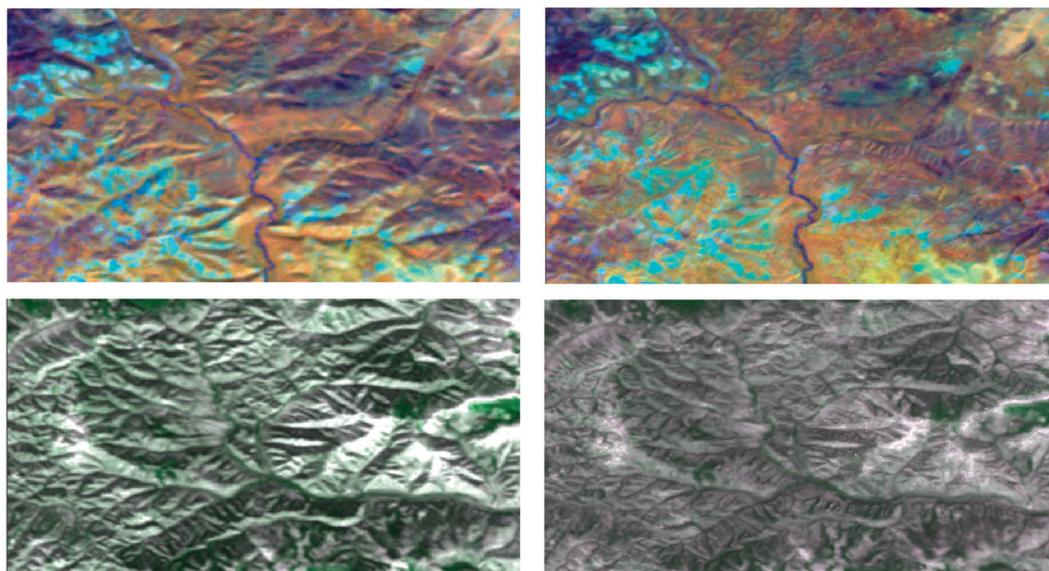


Рис. 4. Зависимость коэффициента Миннаерта от крутизны склона для красного и ближнего ИК-каналов Proba-V в условиях покрытой снегом земной поверхности

По результатам работы с данными Proba-V на территории Приморского края после фильтрации влияния мешающих факторов и топографической нормализации были получены разносезонные композитные изображения в различных спектральных каналах. Проведенная топографическая нормализация позволила значительно снизить влияние рельефа местности на радиометрические свойства изображений и, таким образом, повысить эффективность дальнейшей тематической обработки данных ДЗЗ для решения задач картографирования лесов и других типов растительного покрова. Приведенное на *рис. 5* сравнение фрагментов разносезонных композитных изображений, полученных до топографической нормализации и после ее проведения, наглядно демонстрирует снижение влияния рельефа местности на спектрально-отражательные характеристики земного покрова.



*Рис. 5. Примеры летнего (сверху, RGB: NIR, SWIR, красный) и зимнего (внизу, RGB: красный, NIR, красный) композитных изображений до и после топографической нормализации*

Работа с данными Proba-V проводилась с использованием программно-аппаратного комплекса Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России, контракт 14.607.21.0122, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60715X0122.

## Литература

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А. Синтез улучшенных сезонных изображений Северной Евразии для картографирования и мониторинга динамики растительности по данным SPOT-VEGATATION // Дистанционное зондирование поверхности Земли и атмосферы. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004. Вып. 5. С. 12–14.
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. Самара: ИСОИ РАН, 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.

5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов А.В., Кашицкий В.Ю., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
6. Chavez P.S. Jr. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 62 (9). 1996. P. 1025–1036.
7. Civco D.L. Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery // Photogram. Eng. Remote Sens. Vol. 55. 1989. P. 1303–1309.
8. Dymond J.R., Shepherd J.D. Correction of the topographic effect in remote sensing // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol. 37. 1999. P. 2618–2620.
9. Ekstrand S. Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects // Photogram. Eng. Remote Sens. Vol. 62. 1996. P. 51–161.
10. Gao Y.N., Zhang W.C. Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data // Geogr. Res. Vol. 27. 2008a. P. 467–477.
11. Gao Y.N., Zhang W.C. Simplification and modification of a physical topographic correction algorithm for remotely sensed data // Acta Geodaet. Cartogr. Sin. Vol. 37. 2008b. P. 89–94.
12. Gao M., Zhao W., Gong Zh., Gong H., Chen Zh., Tang X. Topographic Correction of ZY-3 Satellite Images and Its Effects on Estimation of Shrub Leaf Biomass in Mountainous Area // Remote Sens. Vol. 6. 2014. P. 2745–2764.
13. Gu D., Gillespie A. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel Sun-Canopy-Sensor geometry // Remote Sens. Environ. Vol. 64. 1998. P. 166–175.
14. Huang W., Zhang L.P., Li P.X. An improved topographic correction approach for satellite image // J. Image Graph. Vol 10. 2005. P. 1124–1128.
15. Lu D., Ge H., He Sh., Xu A., Zhou G., Du H. Pixel-based Minnaert Correction Method for Reducing Topographic Effects on a Landsat-7 ETM+ Image // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 74. No. 11. 2008. P. 1343–1350.
16. Reeder D.H. Topographic Correction of Satellite Images: Theory and Application. Ph. D. thesis. Dartmouth College. Hanover. NH. USA. 2002. 153 p.
17. Smith J.A., Lin T.L., Ranson K.J. The Lambertian assumption and Landsat data // Photogramm. Eng. Remote Sens. Vol. 46. 1980. P. 1183–1189.
18. Soenen S.A., Peddle D.R., Coburn C.A. SCS+C: A modified Sun-Canopy-Sensor topographic correction in forested terrain // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol. 43. 2005. P. 2148–2159.
19. Stijn H., Emilio C. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. Vol. 13. 2011. P. 691–700.
20. Teillet P.M., Guindon B., Goodenough D.G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data // J. Remote Sens. Vol. 8. 1982. P. 84–106.
21. Vermote E., Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Morcrette J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum. 6S: An overview // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 35. 1997. P. 675–686.
22. Vincini M., Reeder D., Frazzi E. An Empirical Topographic Normalization Method for Forest TM Data // Proceedings of the 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Toronto, Canada, 24–28 June 2002, Vol. 4. P. 2091–2093.

## Radiometric correction for topography-induced distortions in land cover reflectance derived from satellite data

V.A. Egorov, S.A. Bartalev

*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: egorov@d902.iki.rssi.ru*

The application of remote sensing techniques for mapping and monitoring of vegetation in regions with rugged terrain requires compensation of radiometric distortions in the surface reflectance measurements. The growing of surface reflectance variability due to topographical effects is an additional source of errors, resulting in lower accuracy of land cover mapping, its change detection and characteristics evaluation. The topographic normalization aims to transform the surface reflectance measurements of sloped earth's surface to its values at the potentially inherent horizontal flat position in order to reduce differences caused by slopes orientation and steepness. In this paper we propose a new method of topographic normalization of satellite images based on the Minnaert model with adaptive parameters fitting depending on the slope steepness. The proposed method was applied to satellite remote sensing data acquired by Proba-V instrument over Primorye Region. The paper presents the proposed method and experimental results of its evaluation.

**Keywords:** remote sensing, topographical normalization, Minnaert model, Proba-V

*Accepted: 19.10.2016*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-192-201*

## References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometriya MODIS (Satellite mapping of vegetation on Russia MODIS spectroradiometer data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Sostoyaniye i perspektivy razvitiya metodov sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova Rossii (Status and prospects of development of methods of satellite mapping of Russian landcover), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221.
3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Il'in V.O., Loupian E.A., Sintez uluchshennykh sezonnykh izobrazhenii Severnoi Evrazii dlya kartografirovaniya i monitoringa dinamiki rastitel'nosti po dannym SPOT-VEGATATION (Synthesis of improved seasonal images of Northern Eurasia for mapping and monitoring vegetation dynamics according to the SPOT-VEGATATION), *Distantsionnoye zondirovaniye poverkhnosti Zemli i atmosfery*, Irkutsk: ISZF SO RAN, 2004, Vol. 5, pp. 12–14.
4. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Raspoznavaniye pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnykh sputnikovyykh dannyykh spektrometriya MODIS i lokal'no-adaptivnoi klassifikatsii (Recognition of arable land on the basis of long-term satellite data MODIS sensor and locally-adaptive classification), *Komp'yuternaya optika*, Samara: ISOI RAN, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.
5. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov A.V., Kashnitskii V.Yu., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentri kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannyykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (Center for collective use of backup systems, processing and analysis of satellite data for IKI solution study and environmental monitoring applications environment), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 5, pp. 263–284.
6. Chavez P.S. Jr., Image-based atmospheric corrections – revisited and improved, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, Vol. 62 (9), pp. 1025–1036.
7. Civco D.L., Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 1989, Vol. 55, pp. 1303–1309.
8. Dymond J.R., Shepherd J.D., Correction of the topographic effect in remote sensing, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, Vol. 37, pp. 2618–2620.
9. Ekstrand S., Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 1996, Vol. 62, 51–161.
10. Gao Y.N., Zhang W.C., Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data, *Geogr. Res.*, 2008a, Vol. 27, pp. 467–477.
11. Gao Y.N., Zhang W.C., Simplification and modification of a physical topographic correction algorithm for remotely sensed data, *Acta Geodaet. Cartogr. Sin.*, 2008b, Vol. 37, pp. 89–94.
12. Gao M., Zhao W., Gong Zh., Gong H., Chen Zh., Tang X., Topographic Correction of ZY-3 Satellite Images and Its Effects on Estimation of Shrub Leaf Biomass in Mountainous Areas, *Remote Sens*, 2014, No. 6, pp. 2745–2764.
13. Gu D., Gillespie A., Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel Sun-Canopy-Sensor geometry, *Remote Sens. Environ.*, 1998, Vol. 64, pp. 166–175.
14. Huang W., Zhang L.P., Li P.X., An improved topographic correction approach for satellite image, *J. Image Graph.*, 2005, Vol. 10, pp. 1124–1128.
15. Lu D., Ge H., He Sh., Xu A., Zhou G., Du H., Pixel-based Minnaert Correction Method for Reducing Topographic Effects on a Landsat-7 ETM+ Image, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2008, Vol. 74, No. 11, pp. 1343–1350.
16. Reeder D.H., *Topographic Correction of Satellite Images: Theory and Application*, Ph. D. Thesis, Dartmouth College, Hanover, NH, USA, 2002, 153 p.
17. Smith J.A., Lin T.L., Ranson K.J., The Lambertian assumption and Landsat data, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1980, Vol. 46, pp. 1183–1189.
18. Soenen S.A., Peddle D.R., Coburn C.A., SCS+C: A modified Sun-Canopy-Sensor topographic correction in forested terrain, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, Vol. 43, pp. 2148–2159.
19. Stijn H., Emilio C., Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery, *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 2011, Vol. 13, pp. 691–700.
20. Teillet P.M., Guindon B., Goodenough D.G., On the slope-aspect correction of multispectral scanner data, *J. Remote Sens.*, 1982, Vol. 8, pp. 84–106.
21. Vermote E.D., Tanre J.L., Deuze M., Herman J.J., Morcrette Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S An overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol. 35, pp. 675–686.
22. Vincini M., Reeder D., Frazzi E., An Empirical Topographic Normalization Method for Forest TM Data, *In Proceedings of the 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toronto, Canada, 24–28 June 2002, Vol. 4, pp. 2091–2093.