

Оценка применимости алгоритма атмосферной коррекции SREM для анализа временных рядов на примере данных Landsat и его открытая программная реализация

Э. Э. Казаков¹, Ю. И. Борисова^{1,2}

¹ Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: ee.kazakov@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: yulashka.htm@yandex.ru

Проблема атмосферной коррекции материалов дистанционного зондирования Земли из космоса остаётся одной из наиболее неопределённых, но при этом необходимых, в особенности при совместной обработке и интерпретации разновременных данных. Обеспечение наземными данными по состоянию атмосферы для большей части территории планеты всё ещё неудовлетворительное, и качественное конфигурирование моделей атмосферной коррекции, предполагающих ассимиляцию данных о состоянии атмосферы, часто сильно затруднено, особенно для неспециалистов. Алгоритм атмосферной коррекции SREM, предложенный международным коллективом учёных в 2019 г., не требует дополнительных данных об атмосфере, кроме тех, что уже содержатся в метаданных спутникового снимка, при этом авторы показывают высокий уровень качества коррекции. В представленной статье мы предлагаем описание алгоритма SREM на русском языке, дополнительную оценку качества алгоритма SREM для данных спутника Landsat на основе сравнения результатов коррекции с результатами нескольких распространённых методов (авторитетный алгоритм LaSRC, распространённый алгоритм DOS, сырые неоткорректированные данные об отражательной способности) для годового временного ряда, а также открытую программную реализацию SREM на языке Python, доступную для публичного использования, которая, как мы надеемся, поможет привлечь внимание профессионального сообщества к исходному алгоритму. Дополнительная оценка качества показывает удовлетворительные результаты для отдельных спектральных диапазонов (0,53–0,88 мкм) и индексных изображений (например, NDVI) и неудовлетворительные для других (<0,53 мкм, >0,88 мкм, базирующиеся на них индексные изображения, например NDWI, NDBI).

Ключевые слова: Landsat, атмосферная коррекция, SREM, LaSRC, DOS, временные ряды, отражательная способность, NDVI, NDBI, NDWI

Одобрена к печати: 11.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-30-39

Введение

Спутниковое дистанционное зондирование Земли из космоса открыло новую страницу в науках о Земле и об окружающей среде, предоставив уникальный инструмент для изучения природных и антропогенных систем, их динамики и реакции на глобальные изменения (Chuviesco, 2008). С появлением качественных данных относительно высокого пространственного разрешения в публичном доступе, включая архивы (программа Landsat, доступ открыт в 2008 г., архивы — с 1972 г.), интерес к возможностям гражданской космической съёмки резко возрос, во всём мире стали разрабатываться новые методики использования таких данных для самых разных задач — от лесного и сельского хозяйства (Doraiswamy et al., 2004; Vogelmann et al., 2009) до исследования городов (Masek et al., 2000). Однако доступность и популярность данных имеет и обратную сторону — спутниковые данные остаются очень специфическим источником информации с точки зрения предварительной подготовки и корректности интерпретаций и для неспециалиста на пути к их применению возникает множество трудностей, неверное преодоление которых может оказывать существенное влияние на результаты. Массовый пользователь не имеет времени и квалификации для правильной подготовки

данных, большинство существующих инструментов слишком сложны, в результате материалы дистанционного зондирования часто используются некорректно.

Один из основных источников проблем, связанных с предварительной подготовкой данных спутниковой съёмки, — учёт влияния атмосферы Земли на отражённую солнечную радиацию, регистрируемую сенсором космического аппарата (Kondratyev et al., 1992). Атмосфера искажает сигнал, поглощая, рассеивая и переотражая излучение, что может приводить к существенным различиям реального и зарегистрированного спектрального альbedo объектов на поверхности. Для того чтобы учесть эти эффекты, вводится процедура атмосферной коррекции. Методы атмосферной коррекции можно разделить на три категории: относительные; алгоритмы, основанные на анализе изображения; алгоритмы моделирования поведения сигнала в атмосфере (Mahiny, Turner, 2007).

Алгоритмы моделирования поведения сигнала в атмосфере (например, S6 (Vermote et al., 1997), FLAASH (Cooley et al., 2002), LaSRC (Vermote et al., 2016), а также приведённые в работах (Лысенко, 2017; Тарасенков, Белов, 2014; Тарасенков и др., 2019)) часто требуют дополнительной информации о состоянии атмосферы, которая обычно не поставляется вместе с материалами космической съёмки, что затрудняет их применение, особенно неспециалистами. Также зачастую необходимая информация о состоянии атмосферы недоступна или доступна в виде вероятностных оценок (например, результатов моделирования), что приводит к трудноконтролируемому накоплению ошибок при атмосферной коррекции. Реализация таких методов атмосферной коррекции также достаточно трудоёмка. По этим причинам большее распространение получили алгоритмы, основанные на анализе изображения и не требующие внешней информации. Среди них наиболее популярны алгоритмы DOS (Chavez, 1988) и COST (Chavez, 1996), основанные на идее наличия на спутниковой сцене объектов, близких по своим свойствам к абсолютно чёрному телу, и линейной коррекции всех пикселей относительно зарегистрированной яркости таких объектов. И хотя такой подход, очевидно, имеет очень отдалённое отношение к реальному моделированию влияния атмосферы на сигнал, в практическом смысле он оказывается очень полезен и позволяет достичь одной из главных целей атмосферной коррекции — обеспечения сравнимости абсолютных значений на разновременных спутниковых снимках (Chavez, 1996). При этом реализация данных алгоритмов проста и доступна в существующих открытых программных платформах (например, GRASS, SAGA). Однако во многих задачах требуется получение максимально точных абсолютных значений спектрального альbedo, а не только относительно скорректированных.

В июле 2019 г. был опубликован (Bilal et al., 2019) новый метод атмосферной коррекции без привлечения внешней информации о состоянии атмосферы, получивший название SREM (Simplified and Robust Surface Reflectance Estimation Method) (Bilal et al., 2019). Алгоритм построен на учёте общих атмосферных факторов, взаимного положения и углов наклона Солнца и сенсора и является универсальным, т.е. применимым к любым приборам, зондирующим Землю в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Авторы оригинальной статьи показали высокий уровень качества работы алгоритма для разных спектральных диапазонов на примере данных сенсора OLI (спутник Landsat-8). Независимость метода от внешних данных позволяет автоматизировать его работу и создать удобный для пользователей программный интерфейс. В дальнейших разделах статьи показана дополнительная оценка качества и пригодности алгоритма SREM для анализа временных рядов в разных спектральных диапазонах, а также его публичная открытая реализация на языке Python.

Алгоритм SREM

Алгоритм SREM основан на уравнении модели симуляции поведения сигнала в атмосфере 6SV RT (Vermote et al., 1997), которая среди прочего включает в себя параметры, связанные с фактическим состоянием атмосферы: оптической толщиной аэрозолей, содержанием водяного пара, озона и других газов. Авторы оригинального алгоритма поставили задачу исключить из уравнения все внешние параметры, сосредоточившись на наиболее полноценном учёте влияния общих атмосферных эффектов. В конечном счёте метод сводится к линейному

уравнению, все компоненты которого могут быть получены из самого спутникового снимка и его метаданных. Учитывая, что на русском языке описание метода SREM не приводилось, рассмотрим основное уравнение, его составляющие и их доступность в исходных материалах на примере данных сенсора OLI (Landsat-8, уровень обработки L1C), дополнив запись из оригинальной работы некоторыми деталями:

$$\rho_s = \frac{\rho_{TOA} - \rho_R}{(\rho_{TOA} - \rho_R)S_{atm} + T},$$

где ρ_s — искомое значение спектрального альbedo, исправленного с учётом атмосферных искажений; ρ_{TOA} — зарегистрированное на сенсоре спектральное альbedo (может быть рассчитано по официальной методике USGS с использованием метаданных снимка); ρ_R — рэлеевское отражение, рассчитываемое по формуле (все компоненты вычисляются с использованием метаданных):

$$\rho_R = \frac{P_R (1 - e^{-M\tau_r})}{4(\mu_s + \mu_v)};$$

P_R — фазовая функция Рэлея, рассчитываемая по формуле (все компоненты вычисляются с использованием метаданных):

$$P_R = \frac{3A}{4+B}(1 + \cos^2 \theta);$$

θ — угол рассеяния, рассчитываемый по формуле (все компоненты вычисляются с использованием метаданных):

$$\theta = \arccos\left(\left(-1 \times \cos(\mu_s) \cdot \cos(\mu_v)\right) + \left(\sin(\mu_s) \cdot \sin(\mu_v)\right) \cdot \cos(\alpha_{rel})\right);$$

μ_s — зенитный угла Солнца (может быть рассчитан для каждого пикселя и каждого канала с помощью вспомогательного файла _ANG.txt, поставляемого в наборах уровня обработки L1C); μ_v — зенитный угла сенсора (может быть рассчитан для каждого пикселя и каждого канала с помощью вспомогательного файла _ANG.txt, поставляемого в наборах уровня обработки L1C); α_{rel} — относительный азимут, рассчитываемый по формуле (все компоненты описаны далее):

$$\begin{aligned} \alpha_{rel} &= \pi - (\alpha_s - \alpha_v) \quad \text{при } (\alpha_s - \alpha_v) \leq \pi, \\ \alpha_{rel} &= 2\pi - (\alpha_s - \alpha_v) \quad \text{при } (\alpha_s - \alpha_v) > \pi; \end{aligned}$$

α_s — азимут Солнца (может быть рассчитан для каждого пикселя и каждого канала с помощью вспомогательного файла _ANG.txt, поставляемого в наборах уровня обработки L1C); α_v — азимут сенсора (может быть рассчитан для каждого пикселя и каждого канала с помощью вспомогательного файла _ANG.txt, поставляемого в наборах уровня обработки L1C); A — константа, равная 0,9587256; B — константа, равная $1 - A$; M — масса воздушного слоя, рассчитываемая по формуле (все компоненты вычисляются с использованием метаданных):

$$M = \frac{1}{\cos \mu_s} + \frac{1}{\cos \mu_v};$$

S_{atm} — обратное рассеяние атмосферы, рассчитываемое по формуле (все компоненты вычисляются с использованием метаданных):

$$S_{atm} = 0,92\tau_r \cdot e^{-\tau_r};$$

τ_r — оптическая толщина Рэлея, рассчитываемая по формуле (все компоненты вычисляются с использованием метаданных):

$$\tau_r = 0,008569 \times \lambda^{-4} (1 + 0,0113 \times \lambda^{-2} + 0,00013 \times \lambda^{-4});$$

λ — средняя длина волны текущего спектрального диапазона сенсора (доступна в документации к сенсору); T — общая проницаемость атмосферы, включающая проницаемость на пути сигнала от солнца до поверхности и от поверхности до сенсора, рассчитываемая по формуле (все компоненты описаны ранее):

$$T = e^{-\tau_r/\mu_s} + e^{-\tau_r/\mu_s} (e^{0,52\tau_r/\mu_s} - 1) \cdot e^{-\tau_r/\mu_v} + e^{-\tau_r/\mu_v} (e^{0,52\tau_r/\mu_v} - 1).$$

Несмотря на исключение из основного уравнения всех компонентов, связанных с фактическим состоянием атмосферы, в оригинальной работе показана высокая эффективность (со средней ошибкой около 0,015 спектрального альбедо) на примере сенсоров TM (Landsat-4/5), ETM+ (Landsat-7), OLI (Landsat-8) при разных атмосферных условиях. Также отдельно стоит отметить, что значения зенитных углов и азимутов Солнца и сенсора должны быть рассчитаны отдельно для каждого канала и каждого пикселя.

Оценка применимости SREM для анализа временных рядов

Атмосферная коррекция наиболее важна при решении задач, связанных со сравнением разновременных снимков, анализом временных рядов, поэтому мы решили проверить качество работы метода SREM на частном примере анализа данных OLI уровня обработки L1C за один год, охватив все сезоны.

Данные и методы

В качестве исходных данных для проверки были использованы 15 снимков сенсора OLI (Landsat-8) уровня обработки L1C, охватывающих территорию на северо-востоке Китая и диапазон дат с 31 июля 2018 г. по 18 июля 2019 г. Территория (рис. 1, см. с. 34) характеризуется присутствием большого количества ландшафтов разного типа (в том числе урбанизированных), а также большим перепадом высот (около 1200 м). В пределах сцены присутствуют горные и относительно равнинные участки, речная система, водоёмы.

Сенсор OLI Landsat-8 осуществляет зондирование в следующих основных диапазонах длины волны (каналах): 0,43–0,45 мкм (1-й канал); 0,45–0,51 (2-й канал); 0,53–0,59 (3-й канал); 0,64–0,67 (4-й канал); 0,85–0,88 (5-й канал); 1,57–1,65 (6-й канал); 2,11–2,29 мкм (7-й канал). Все перечисленные каналы имеют пространственное разрешение 30 м и радиометрическое разрешение 16 бит.

В качестве эталонных данных были использованы результаты атмосферной коррекции по методу LaSRC, проведённой стороной поставщика (USGS) по заказу. Алгоритм LaSRC специально предназначен для коррекции материалов Landsat и по существующим оценкам качества (Pori et al., 2019; Vermote et al., 2018) является одним из лучших. LaSRC предполагает ассимиляцию фактических данных об атмосфере, включая содержание аэрозолей, водяного пара и озона, и учёт общих атмосферных факторов, в том числе зенитных углов Солнца и сенсора, а также их азимутов. Важным недостатком метода LaSRC является невозможность обработки при недостатке данных об атмосфере. Так, например, по этой причине нам было отказано в заказе коррекции для 8 из 16 сцен на территорию республики Татарстан за аналогичный временной период. Для выбранной территории все 15 сцен были успешно обработаны и приняты за эталонные.

Коррекция для каналов с 1-го по 7-й осуществлялась двумя методами: SREM — на основе собственной программной реализации и DOS (Dark Object Subtraction) — распространённым методом коррекции, реализованным, в частности, в открытой ГИС-платформе SAGA (ГИС — геоинформационные системы). Сравнение с популярным методом DOS, который также не требует внешних данных об атмосфере, может показать границы применимости и потенциальную востребованность алгоритма SREM. При этом важно ещё раз отметить, что SREM основан на учёте атмосферных факторов и их физики, в то время как DOS использует статистики самого

исходного изображения и по этой причине является менее предсказуемым и универсальным, хотя и удобным. Также в сравнение мы включили исходные значения спектрального альbedo (без атмосферной коррекции), чтобы контролировать возможное ухудшение данных в результате обработки.

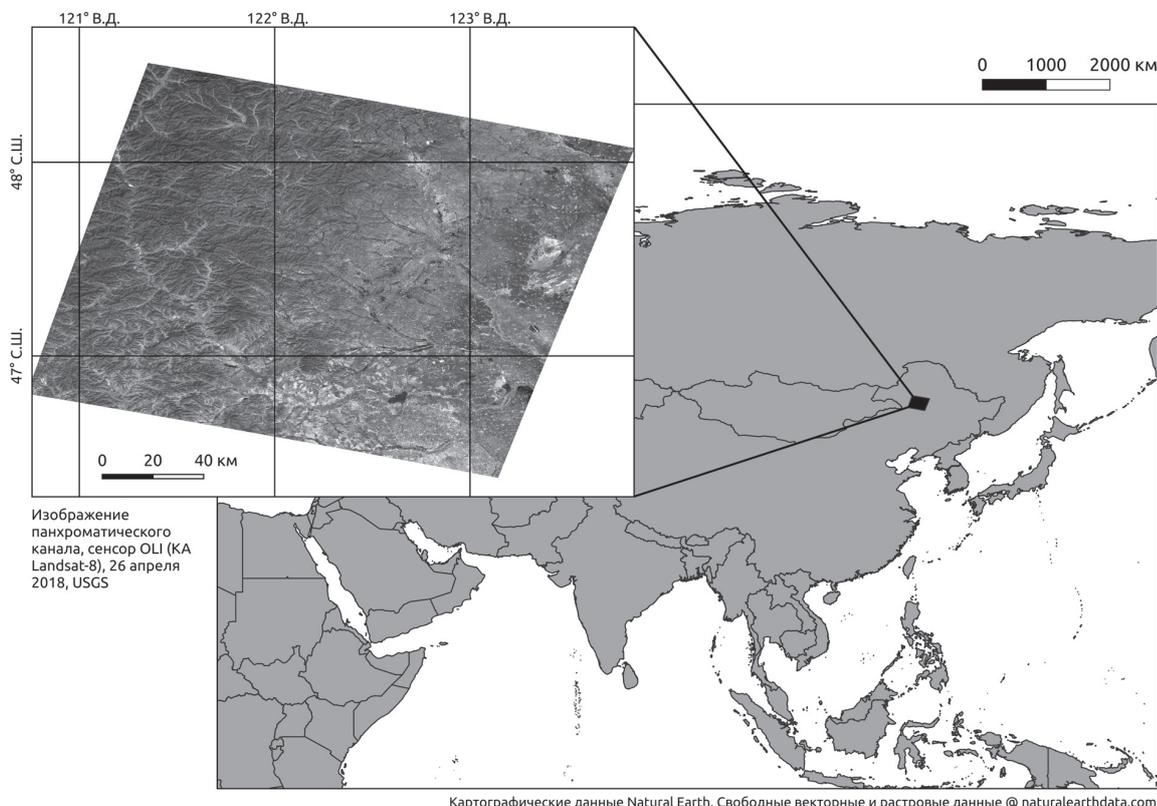


Рис. 1. Территория, выбранная для тестирования

Помимо значений спектрального альbedo, полученного разными способами, контролировались также некоторые распространённые производные метрики, в частности нормализованные разностные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), NDWI (Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс) и NDBI (Normalized Difference Built Index — стандартизованный индекс различий застройки). Эти метрики очень часто применяются в исследованиях, использующих данные Landsat, и важно оценить влияние на них ошибок атмосферной коррекции.

Оценка качества проводилась в следующих режимах:

- оценка средней квадратической ошибки для канала (или индекса) по всей сцене;
- оценка средней квадратической ошибки и корреляции временного ряда для отдельных пикселей различных типов ландшафтов;
- оценка средней квадратической ошибки и корреляции временного ряда для зональных статистик различных типов ландшафтов.

Разделение ландшафтов производилось визуально и включает шесть классов: городские территории, сельскохозяйственные поля, леса, болота, водоёмы, открытый грунт.

В итоге проведённый анализ охватывает 10 метрик (7 спектральных каналов и 3 производных индекса), 15 временных отметок, 6 типов ландшафтов и несколько подходов, связанных с оценкой качества коррекции целой сцены и отдельных пикселей/зон, представляющих конкретные типы ландшафтов.

Результаты

Самый общий вид анализа — оценка средней квадратической ошибки за весь временной период по всем пикселям всех сцен — показал, что метод SREM прекрасно работает для каналов в спектральном диапазоне от 0,53 до 0,88 мкм, т.е. в красном, зелёном и ближнем инфракрасном. Совокупная ошибка по всем сезонам для каждого из этих каналов составила менее 0,01 в единицах спектрального альbedo (0,0075; 0,0057 и 0,0054 для красного, зелёного и ближнего инфракрасного соответственно), достаточно равномерно распределяясь по времени и значимо (до 0,02) увеличиваясь только в зимний период (рис. 2). Ошибка в определении индекса NDVI напрямую связана с ошибками коррекции 4-го и 5-го каналов и с марта по октябрь, т.е. месяцы, охватывающие основные фазы вегетации, по методу SREM вычисляется с ошибкой около 0,02.

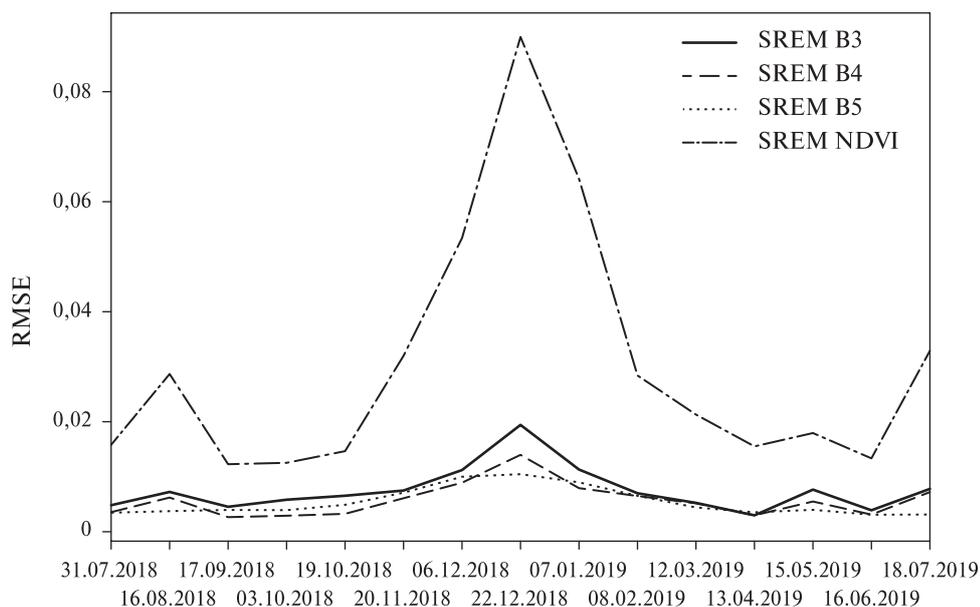


Рис. 2. Временная динамика средней квадратической ошибки (Root Mean Square Error — RMSE) метода SREM для 3–5-го каналов и индекса NDVI сенсора OLI (Landsat-8)

Однако для всех остальных каналов корректность вычислений оказалась ниже. Для синего диапазона длин волн совокупная ошибка составила 0,043 в единицах спектрального альbedo, а для каналов среднего инфракрасного диапазона (6-й и 7-й каналы) — 0,093 и 0,123 соответственно, что существенно превышает приемлемые для решения большинства задач допуски. В сравнении, для 2-го канала наилучшую эффективность показал метод DOS (с ошибкой 0,014), а для среднего инфракрасного диапазона исходные неоткорректированные данные оказались более точными (0,011 и 0,012 для 6-го и 7-го каналов соответственно), т.е. оба вида коррекции (SREM и DOS) оказались избыточными и даже ухудшающими данные. Общие характеристики совокупных ошибок для разных методов и каналов/индексов показаны на рис. 3 (см. с. 36).

При анализе временных рядов по отдельным типам ландшафтов (в точках и по зонам) наблюдается сохранение порядка ошибок для всех спектральных диапазонов и индексов по всем типам ландшафтов. Временная корреляция (по Пирсону) для 3–5-го каналов и NDVI у SREM колеблется в районе 0,98–0,99; для сравнения, у DOS корреляция падает до 0,84. Типичный пример временного ряда средних значений NDVI в пределах ландшафта (на примере болота) показан на рис. 4 (см. с. 36). Временной ход индексов NDWI и NDBI, зависящих от каналов в среднем инфракрасном диапазоне, имеет низкие показатели корреляции с эталонным рядом и высокие ошибки, достигающие до 0,5 спектрального альbedo.

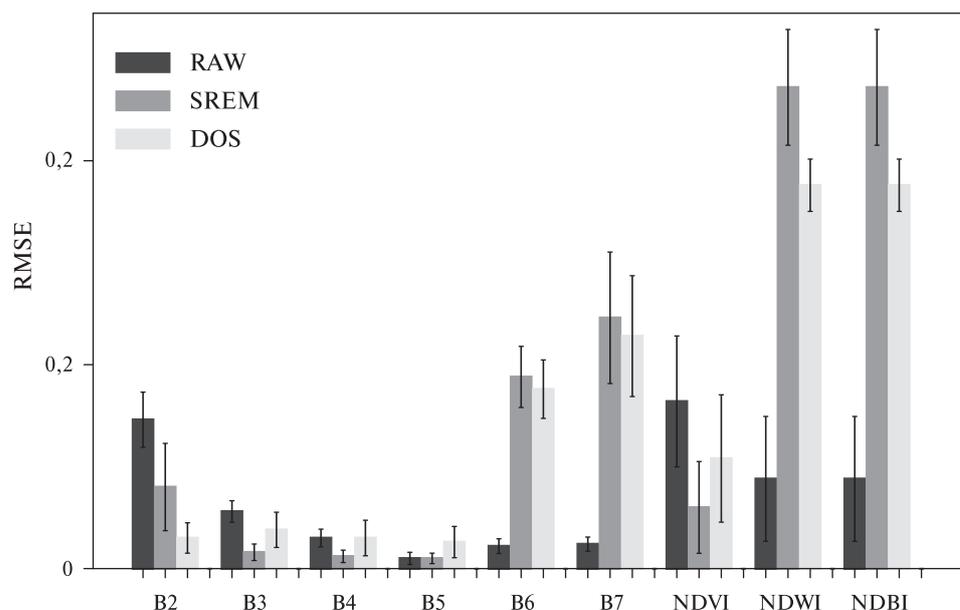


Рис. 3. Совокупная средняя квадратическая ошибка (RMSE) для разных каналов/индексов трёх типов коррекции: данные без атмосферной коррекции (RAW), откорректированные методом SREM, откорректированные методом DOS

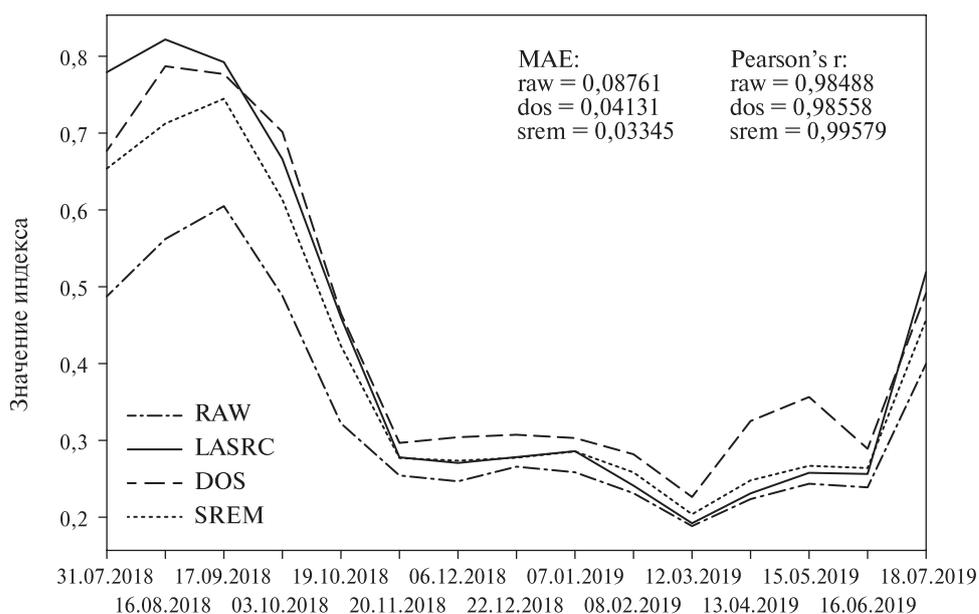


Рис. 4. Временной ход средних значений NDVI в болотных ландшафтах при использовании различных методов коррекции (RAW — неоткорректированные данные). Также приведены сведения о средней абсолютной ошибке (Mean Absolute Error — MAE) и корреляции временных рядов (Pearson's correlation coefficient (r))

Открытая программная реализация

Линейность вычислений и отсутствие зависимостей от внешних данных позволяют полностью автоматизировать обработку информации и получение откорректированных материалов. Мы предлагаем собственную реализацию на языке Python, весьма распространённом в сообществах, связанных с науками о Земле и окружающей среде. Исходный код распространяется по открытой лицензии GNU GPL v.3 и доступен по адресу <https://github.com/eduard-kazakov/SREMPy-landsat>.

Открытая реализация включает три блока: блок чтения метаданных Landsat, блок радиометрической калибровки и собственно блок атмосферной коррекции по методу SREM. Основная документация доступна на приведённой выше веб-странице. Для удобной и быстрой работы с модулем пользователям предлагается единая функция `process_full_landsat_dataset_with_usgs_util`, осуществляющая автоматическую коррекцию всех каналов (за исключением тепловых) исходного набора Landsat-8 уровня обработки L1C, требуется только указать пути до всех необходимых файлов. Для полноценной и правильной работы алгоритма атмосферной коррекции необходимо загрузить и скомпилировать утилиту USGS с открытым исходным кодом, выполняющую функцию расчёта зенитных углов и азимутов Солнца и сенсора, ссылка приведена в документации.

Заключение и дискуссия

Авторы надеются, что публикация открытого программного модуля для работы с новым методом атмосферной коррекции привлечёт внимание сообщества и будет способствовать появлению работ, исследующих его, и, возможно, использующих такой метод для коррекции материалов спутниковой съёмки. Сам метод демонстрирует высокий уровень достоверности при коррекции данных съёмки в красном, зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн и, соответственно, при применении его для расчёта вегетационных индексов, использующих эти каналы. При этом использование SREM для синего диапазона требует определённой осторожности, а для среднего инфракрасного, по нашим оценкам, он вовсе не применим.

Основным вопросом дискуссии остаётся следующий: за счёт чего методом SREM достигаются высокие показатели качества для диапазонов длин волн 0,53–0,88 мкм, если он никаким образом не ассимилирует данные о фактическом газовом состоянии атмосферы? Мы предполагаем, что общие атмосферные эффекты на этих длинах волн, учитываемые алгоритмом, оказывают более существенное влияние на сигнал, по сравнению с которым эффекты частного газового состава можно считать незначительными. Однако этот вопрос требует отдельной проработки и исследований.

Литература

1. *Лысенко С.А.* Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 09. С. 775–788.
2. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Алгоритм атмосферной коррекции спутниковых изображений неоднородной земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах длин волн // *Вычислительные технологии.* 2014. Т. 19. № 3. С. 48–56.
3. *Тарасенков М.В., Зимовая А.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Восстановление коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым измерениям MODIS с учетом поляризации излучения // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32. № 08. С. 641–649.
4. *Bilal M., Nazeer M., Nichol J. E., Bleiweiss M. P., Qiu Z., Jäkel E., Campbell J. R., Atique L., Huang X., Lolli S.* A Simplified and Robust Surface Reflectance Estimation Method (SREM) for Use over Diverse Land Surfaces Using Multi-Sensor Data // *Remote Sensing.* 2019. V. 11. No. 11. P. 1344.
5. *Chavez Jr. P.S.* An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data // *Remote Sensing of Environment.* 1988. V. 24. No. 3. P. 459–479.
6. *Chavez Jr. P.S.* Image-based atmospheric corrections — revisited and improved // *Photogrammetric engineering and remote sensing.* 1996. V. 62. No. 9. P. 1025–1035.
7. *Chuvieco E.* Earth observation of global change: The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment. Springer, 2008. 223 p.
8. *Cooley T., Anderson G. P., Felde G. W., Hoke M. L., Ratkowski A. J., Chetwynd J. H., Gardner J. A., Adler-Golden S. M., Matthew M. W., Berk A., Bernstein L. S., Acharya P. K., Miller D., Lewis P.* FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2002. V. 3. P. 1414–1418.

9. Doraiswamy P. C., Hatfield J. L., Jackson T. J., Akhmedov B., Prueger J., Stern A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 92. No. 4. P. 548–559.
10. Ilori C. O., Pahlevan N., Knudby A. Analyzing Performances of Different Atmospheric Correction Techniques for Landsat 8: Application for Coastal Remote Sensing // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 4. P. 469.
11. Kondratyev K. Y., Kozoderov V. V., Smokty O. I. Remote sensing of the Earth from space: atmospheric correction. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 478 p.
12. Mahiny A. S., Turner B. J. A comparison of four common atmospheric correction methods // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2007. V. 73. No. 4. P. 361–368.
13. Masek J. G., Lindsay F. E., Goward S. N. Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973–1996, from Landsat observations // *Intern. J. Remote Sensing*. 2000. V. 21. No. 18. P. 3473–3486.
14. Vermote E. F., Tanré D., Deuzé J. L., Herman M., Morcette J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview // *Proc. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1997. V. 35. No. 3. P. 675–686.
15. Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B., Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 185. P. 46–56.
16. Vermote E., Roger J. C., Franch B., Skakun S. LASRC (Land Surface Reflectance Code): Overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and Sentinel 2 data's // *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*. 2018. P. 8173–8176.
17. Vogelmann J. E., Tolk B., Zhu Z. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multi-temporal Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. No. 8. P. 1739–1748.

Evaluation of the SREM atmospheric correction algorithm applicability to time series analysis using Landsat data example and its open source software implementation

E. E. Kazakov¹, Yu. I. Borisova^{1,2}

¹ *State Hydrological Institute, Saint Petersburg 199178, Russia*
E-mail: ee.kazakov@gmail.com

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199178, Russia*
E-mail: yulashka.htm@yandex.ru

The problem of Earth remote sensing data atmospheric correction remains one of the most uncertain, but at the same time acute, especially for processing and interpretation of different-time data. The provision of terrestrial atmospheric data for most of the planet is still unsatisfactory, and the qualitative configuration of atmospheric correction models involving assimilation of atmospheric data is often very difficult, especially for non-specialists. The SREM atmospheric correction algorithm, proposed by an international team of scientists in 2019, does not require additional atmospheric data other than those already contained in the metadata of a satellite image. Authors show a high level of correction quality. In this paper, we offer a description of the SREM algorithm in Russian, an additional assessment of the quality of the SREM algorithm for Landsat data based on a comparison of correction results with the results of several common methods (authoritative LaSRC algorithm, popular DOS algorithm, raw non-corrected reflectance data) for the annual time series, as well as an open software implementation of SREM in Python, available for public use, which, we hope, will help to attract the attention of the professional community to the original algorithm. Additional quality assessment shows satisfactory performance for some spectral ranges (0.53–0.88 microns) and index images (e.g. NDVI), and unsatisfactory for others (<0.53 μm , >0.88 μm , index images based on them, e.g. NDWI, NDBI).

Keywords: Landsat, atmospheric correction, SREM, LaSRC, DOS, time-series, surface reflectance, NDVI, NDBI, NDWI

Accepted: 11.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-30-39

References

1. Lysenko S. A., Atmosfernaya korrektsiya mnogospektral'nykh sputnikovykh snimkov na osnove approksimatsionnoi modeli perenosa solnechnogo izlucheniya (Atmospheric correction of multispectral satellite images based on the approximate model of the solar radiation transfer), *Optika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 30, No. 9, pp. 775–788.
2. Tarasenkov M. V., Belov V. V., Algoritm atmosfernoii korrektsii sputnikovykh izobrazhenii neodnorodnoi zemnoi poverkhnosti v vidimom i UF-diapazonakh dlin voln (Atmospheric correction algorithm for satellite images of nonuniform Earth's surface in the visible and UV ranges), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2014, Vol. 19, No. 3, pp. 48–56.
3. Tarasenkov M. V., Zimovaya A. V., Belov V. V., Engel M. V., Vosstanovlenie koeffitsientov otrazheniya zemnoi poverkhnosti po sputnikovym izmereniyam MODIS s uchedom polarizatsii izlucheniya (Reconstruction of the Earth surface reflection coefficients from MODIS satellite measurements with allowance for radiation polarization), *Optika atmosfery i okeana*, 2019, Vol. 32, No. 8, pp. 641–649.
4. Bilal M., Nazeer M., Nichol J. E., Bleiweiss M. P., Qiu Z., Jäkel E., Campbell J. R., Atique L., Huang X., Lolli S., A Simplified and Robust Surface Reflectance Estimation Method (SREM) for Use over Diverse Land Surfaces Using Multi-Sensor Data, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 11, p. 1344.
5. Chavez Jr. P. S., An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, *Remote Sensing of Environment*, 1988, Vol. 24, No. 3, pp. 459–479.
6. Chavez Jr. P. S., Image-based atmospheric corrections — revisited and improved, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, Vol. 62, No. 9, pp. 1025–1035.
7. Chuvieco E., *Earth observation of global change: The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment*, Springer, 2008, 223 p.
8. Cooley T., Anderson G. P., Felde G. W., Hoke M. L., Ratkowski A., Chetwynd J. H., Gardner J. A., Adler-Golden S. M., Matthew M. W., Berk A., Bernstein L. S., Acharya P. K., Miller D., Lewis P., FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2002, Vol. 3, pp. 1414–1418.
9. Doraiswamy P. C., Hatfield J. L., Jackson T. J., Akhmedov B., Prueger J., Stern A., Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 92, No. 4, pp. 548–559.
10. Ilori C. O., Pahlevan N., Knudby A., Analyzing Performances of Different Atmospheric Correction Techniques for Landsat 8: Application for Coastal Remote Sensing, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 4, p. 469.
11. Kondratyev K. Y., Kozoderov V. V., Smokty O. I., *Remote Sensing of the Earth from Space: Atmospheric Correction*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, 478 p.
12. Mahiny A. S., Turner B. J., A comparison of four common atmospheric correction methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, Vol. 73, No. 4, pp. 361–368.
13. Masek J. G., Lindsay F. E., Goward S. N., Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 197–1996, from Landsat observations, *Intern. J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, No. 18, pp. 3473–3486.
14. Vermote E. F., Tanré D., Deuzé J. L., Herman M., Morcette J. J., Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol. 35, No. 3, pp. 675–686.
15. Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B., Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 185, pp. 46–56.
16. Vermote E., Roger J. C., Franch B., Skakun S., LASRC (Land Surface Reflectance Code): Overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and Sentinel 2 data, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2018, pp. 8173–8176.
17. Vogelmann J. E., Tolk B., Zhu Z., Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 8, pp. 1739–1748.