

Сравнение спектральных характеристик отражения вулканов Камчатки по данным авиационных и спутниковых измерений

М. Ю. Беляев¹, Л. В. Катковский², О. О. Силюк², Б. И. Беляев²,
С. И. Бручковская², Д. А. Иванов², А. М. Есаков¹, В. Е. Фокин³

¹ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
г. Королёв, 141070, Россия
E-mail: post@rsce.ru*

² *Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского
государственного университета, Минск, 220045, Республика Беларусь
E-mail: remsens@mail.ru*

³ *Центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина
Московская обл., Звёздный городок, 141160, Россия
E-mail: info@gctc.ru*

В статье представлены результаты сравнения самолётных измерений спектров отражения ряда вулканов и прилегающих территорий Камчатского полуострова и съёмок этих же объектов сенсором OLI (Operational Land Imager) спутника Landsat-8. Авиационные измерения проводились с использованием фотоспектрорадиометра (ФСР) высокого спектрального разрешения с борта самолёта Ту-134ЛК Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина в рамках подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений с борта Международной космической станции, в частности в рамках таких космических экспериментов, как «Ураган», «Дубрава» и «Сценарий». Верификация авиационных и спутниковых данных Landsat-8 выполнена как по спектральным значениям яркости излучения на верхней границе атмосферы, так и по коэффициентам спектральной яркости (альbedo) у поверхности Земли. При этом для самолётных измерений проводится пересчёт спектров отражения на верхнюю границу атмосферы к условиям спутниковых измерений, а также атмосферная коррекция самолётных спектров для получения спектров альbedo подстилающей поверхности. Значения альbedo поверхности в каналах Landsat-8 с атмосферной коррекцией генерируются по методу LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code) и предоставляются пользователям в открытом доступе. Кроме того, спектры яркости и альbedo поверхности, полученные из измерений ФСР, пересчитываются в соответствующие средние значения для каналов сенсора OLI спутника Landsat-8 с использованием относительных спектральных чувствительностей каналов последнего.

Ключевые слова: вулканы Камчатки, спектры отражения, самолётные измерения, спутниковые данные, атмосферная коррекция

Одобрена к печати: 18.09.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-115-129

Введение

Одним из важнейших направлений деятельности космонавтов на борту Международной космической станции (МКС) является проведение визуально-инструментальных наблюдений Земли в рамках выполнения научной программы исследований (космические эксперименты «Ураган», «Дубрава» и «Сценарий»). Для подготовки к выполнению подобных наблюдений с 13 по 26 августа 2018 г. на самолёте-лаборатории Ту-134ЛК ЦПК проводились учебно-тренировочные полёты космонавтов, специалистов Центра подготовки космонавтов (ЦПК), Ракетно-космической корпорации «Энергия», а также учёных институтов Российской академии наук и специалистов МЧС по исследованию природных и техногенных объектов, расположенных на территории восточных регионов страны, таких как Сибирь, Республика Бурятия, Забайкальский край, Дальний Восток, Сахалин, Курилы и Камчатский край. Из отряда космонавтов «Роскосмоса» в полётах принимали участие Сергей Кудь-Сверчков,

Дмитрий Петелин, Мухтар Аймаханов, Сергей Корсаков, Петр Дубров, Андрей Федяев и Анна Кикина. Эти полёты позволяют космонавтам не только закрепить теоретические знания, но и отработать необходимые практические навыки по работе с фото- и спектрометрической аппаратурой (Беляев и др., 2015, 2016; Belyaev et al., 2018).

22 августа 2018 г. были выполнены два учебно-тренировочных полёта над восточной частью Камчатского полуострова и северной частью Курильских островов. В ходе полётов самолёта-лаборатории по маршруту, которые осуществлялись на высоте 9300–10 100 м, в рамках обучения космонавтов работе с фотоспектрорадиометром (ФСР) (рис. 1) были получены спектры ряда вулканов Камчатского п-ова, Долины гейзеров и двух вулканов Курильских островов. ФСР — это фотоспектрорадиометр высокого спектрального разрешения (2–3 нм) в диапазоне 400–900 нм, предназначенный для измерения спектров и изображений всех типов природных поверхностей и полигонов в наземных условиях и с борта авиационных носителей (Станчик, Хомицевич, 2017). Аппаратура включает в себя систему регистрации изображений на базе смартфона и спектров с помощью спектрорадиометра разработки Института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ), объединённых в единый модуль. Кроме того, ФСР обеспечивает пространственную привязку областей спектрометрирования к изображениям, а также спектров и изображений к навигационным данным ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования) (время, географические координаты), запись в память и просмотр данных. Погрешность измерения абсолютной спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) подстилающей поверхности составляет 5 %.



Рис. 1. Работа с ФСР на борту самолёта-лаборатории

Полученная в ходе самолётных измерений спектральная информация представляет особый научный интерес ввиду трудной досягаемости этих объектов для наземных измерений. Атмосферная коррекция полученных спектров позволит создать библиотеку коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) объектов, которую можно будет использовать для мониторинга состояния вулканов, а также изучения их свойств и состава поверхности. Измеренные спектры СПЭЯ позволяют проводить валидацию со спутниковыми данными. В настоящей работе

представлены некоторые расчёты на основе значений альbedo поверхности, а также методика и результаты верификации самолётных и спутниковых данных.

Для проведения верификации были использованы спутниковые снимки исследуемой территории, зафиксированные аппаратом Landsat-8. На *рис. 2* показана трасса пролёта и объекты спектрометрирования, а также четыре «сшитых» спутниковых изображения, покрывающие территорию пролёта. Данные Landsat-8 получены в тот же день, когда проводились полётные авиационные измерения (22.08.2018), с углом возвышения Солнца $\sim 46^\circ$ (угол возвышения при самолётных измерениях составлял от $45,4$ до $46,7^\circ$). Вулканы Курильских островов эта серия измерений спутниковым сенсором не захватила, а изображение, покрывающее влк. Большая Удина, закрыто сплошной облачностью, поэтому валидация по названным объектам не проводилась.

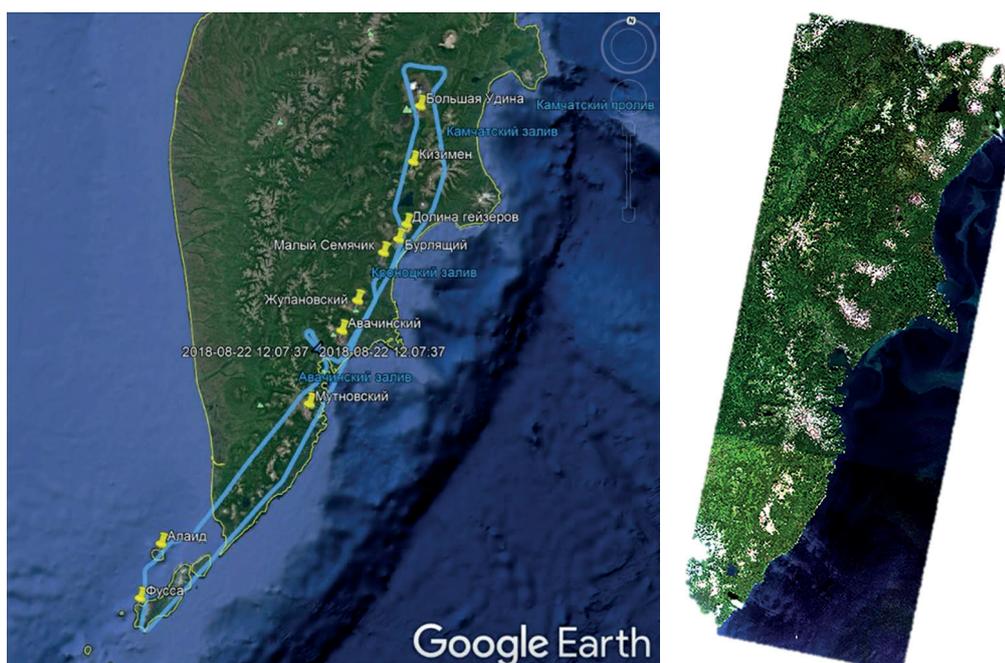


Рис. 2. Трасса пролёта (синяя линия) и объекты, спектры которых были получены (жёлтые метки) (*слева*); сшитые спутниковые изображения сенсора Landsat-8, покрывающие территорию пролёта (*справа*)

Методика обработки и верификации самолётных и спутниковых измерений

СПЭЯ на верхней границе атмосферы

Для сопоставления самолётных измерений со спутниковыми необходимо пересчитать измеренные спектры на верхнюю границу атмосферы. Чтобы исследовать, как различаются СПЭЯ, регистрируемые на верхней границе атмосферы и на высоте 10 км (средняя высота полёта самолёта-лаборатории), были проведены численные расчёты для различных типов подстилающих поверхностей с использованием прикладного пакета программного обеспечения LibRadtran. Данный программный продукт поддерживает моделирование переноса излучения в атмосфере с учётом целого набора параметров, таких как модель атмосферы, молекулярное рэлеевское рассеяние, поглощение газовыми составляющими, аэрозольное рассеяние и поглощение (в том числе водяными и ледяными облаками) и т.д. На *рис. 3* (см. с. 118) представлены отношения (в зависимости от длины волны) СПЭЯ излучения, направленного вертикально вверх, для высоты 10 км к СПЭЯ уходящего излучения на верхней границе атмосферы (условно 100 км) для различных типов рассчитанных подстилающих поверхностей, наиболее характерных для исследуемой территории.

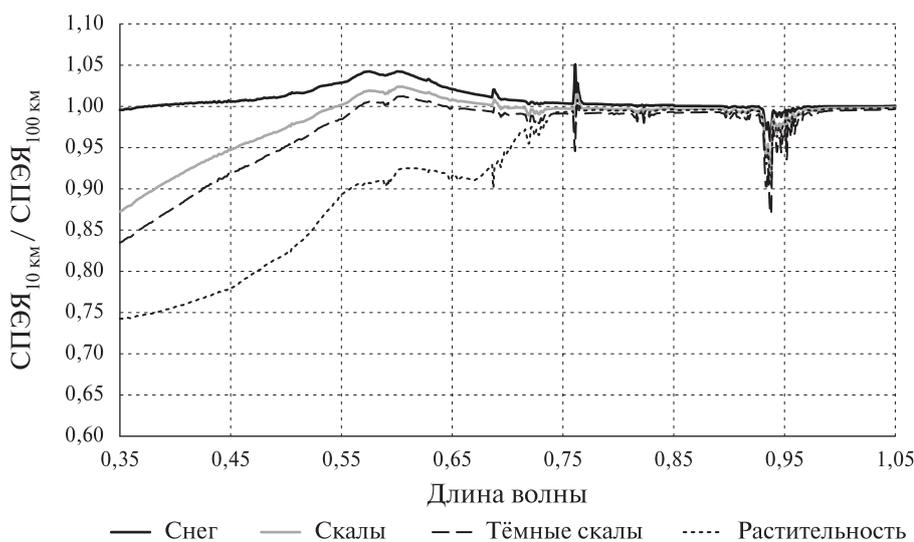


Рис. 3. Отношения СПЭЯ на высоте 10 и 100 км

Ввиду того, что при спектрометрировании подстилающей поверхности с высоты 10 км в поле зрения спектрометра ФСР ($2,2 \times 0,25^\circ$), как правило, попадает смесь различных типов поверхности, для каждого случая использовалась усреднённая кривая (по имеющимся в поле зрения прибора типам поверхности, определяется визуально) в качестве корректирующей функции $k_1(\lambda)$ для пересчёта измеренных спектров СПЭЯ с высоты 10 км на верхнюю границу атмосферы. Также производилась коррекция на пропускание стекла T_λ илюминатора самолёта путём ввода корректирующей функции $k_2(\lambda) = 1/T_\lambda$.

Как было показано выше, спектры ФСР обладают высоким спектральным разрешением (порядка 2000 точек на рабочий спектральный диапазон 400–900 нм). Мультиспектральные спутниковые сенсоры в этом диапазоне имеют несколько каналов. Так, спутниковый аппарат Landsat-8 имеет пять спектральных каналов: Ultra Blue (435–451 нм), Blue (452–512 нм), Green (533–590 нм), Red (636–673 нм), NIR (851–879 нм).

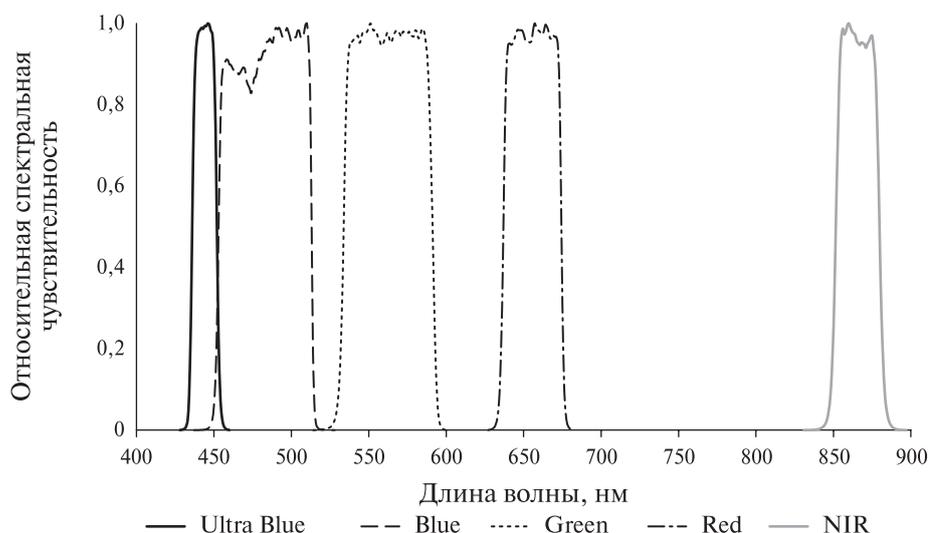


Рис. 4. Относительная спектральная чувствительность каналов Landsat-8

Для верификации самолётных и спутниковых данных необходимо пересчитать спектр ФСР с высоким спектральным разрешением в спектр из пяти точек, соответствующих каналам сенсора Landsat-8. Процедура пересчёта осуществляется по формуле:

$$B_{sat} = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda)B(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $S(\lambda)$ — функция относительной спектральной чувствительности i -го канала спутникового сенсора; $B(\lambda)$ — измеренный спектр подстилающей поверхности.

Графики функций спектральных чувствительностей, используемых при верификации каналов Landsat-8, изображены на *рис. 4*.

Помимо описанных особенностей необходимо также учитывать неоднородность условий освещения. Измеряемая спутниковым сенсором или самолётным спектрометром спектральная яркость излучения зависит от зенитных углов Солнца, которые неодинаковы при съёмках данной подстилающей поверхности разными аппаратами из-за разницы во времени съёмки. Поправочный коэффициент в данном случае рассчитывается из формулы:

$$k_3 = \frac{\cos \theta_{\text{ФСР}}}{\cos \theta_{\text{L8}}}, \quad (2)$$

где $\theta_{\text{ФСР}}$ и θ_{L8} — зенитный угол Солнца при измерении одного и того же объекта фотоспектрорадиометром и сенсором Landsat-8 соответственно.

Наконец, ошибка сопоставления данных рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \left(1 - \frac{B_{\text{ФСР}}}{B_{\text{L8}}} \right) \times 100\%, \quad (3)$$

где $B_{\text{ФСР}}$ — пересчитанные с учётом коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 СПЭЯ ФСР для соответствующего i -го канала Landsat-8; B_{L8} — значения СПЭЯ Landsat-8 в i -м канале (Ultra Blue, Blue, Green, Red, NIR), пересчитанные с учётом коэффициента k_3 .

Необходимо отметить, что при расчёте ошибки Δ , в качестве СПЭЯ, измеренного спутниковым аппаратом, брался усреднённый спектр СПЭЯ с площадки изображения 12×2 пикселей, что примерно соответствует спектрометрируемой ФСР области с высоты 10 км и с полем зрения $2,2 \times 0,25^\circ$.

Определение альbedo поверхности

Поскольку для данных съёмки сенсором Landsat-8 обработанная информация доступна в виде значений альbedo подстилающей поверхности в каждом из каналов (Landsat Surface Reflectance Code), спектры альbedo подстилающей поверхности были получены нами выполнением атмосферной коррекции измеренных спектров с использованием разработанной ранее методики (Katkovsky et al., 2018a).

Указанная быстрая методика атмосферной коррекции включает оптико-физическую модель атмосферы и основана на использовании аналитических формул для СПЭЯ уходящего излучения на верхней границе атмосферы (условно 100 км) или на любой другой высоте в диапазоне 0–100 км (Katkovsky et al., 2018b). На первом шаге алгоритма при решении обратной задачи оптики атмосферы с использованием измеренного спектра находятся параметры атмосферы и поверхности (константы, не зависящие от длины волны). На этом шаге альbedo поверхности задаётся в виде линейной комбинации с неизвестными весовыми множителями библиотечных спектров типовых поверхностей, присутствие которых в спектре можно примерно идентифицировать по изображениям ФСР. В конечном итоге искомый спектр альbedo спектрометрируемой области выражается из аналитических формул для СПЭЯ, куда подставляется измеренная СПЭЯ и параметры атмосферы, найденные на первом шаге.

Результаты обработки и верификации

В данном разделе приводятся фотоснимки, выполненные космонавтами с борта самолёта-лаборатории, а также результаты верификации спутниковых и самолётных данных по двум методикам, описанным выше, для следующих объектов: Долина гейзеров (*рис. 5–7* (см. с. 121), *табл. 1–2*), вулканы Большой Семячик (*рис. 8–9* (см. с. 122), *табл. 3*), Малый Семячик (*рис. 10–11* (см. с. 123), *табл. 4*), Жупановский (*рис. 12–13* (см. с. 124), *табл. 5*), Авачинский (*рис. 14–15* (см. с. 125), *табл. 6*), Мутновский (*рис. 16–17* (см. с. 126), *табл. 7*). Некоторое несовпадение ракурсов вулканов на этих фотографиях объясняется тем, что снимки ФСР сделаны через надирный иллюминатор, а космонавты проводили съёмку через боковые иллюминаторы. На изображениях объектов, зафиксированных смартфоном ФСР, красной рамочкой помечена спектрометрируемая область. На приведённых ниже изображениях рамка не всегда находится по центру кадра, так как зачастую кадр захватывал не только изображение земной поверхности через иллюминатор, но и тёмную околоиллюминаторную область, которая была обрезана.

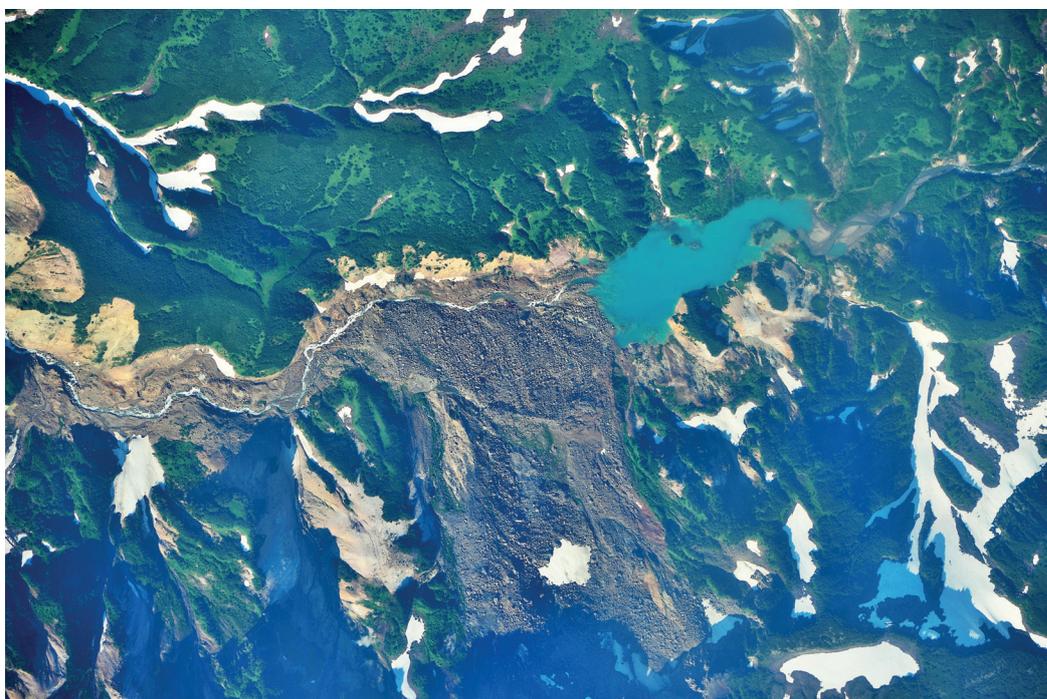


Рис. 5. Долина гейзеров. Оператор Корсаков С. В.

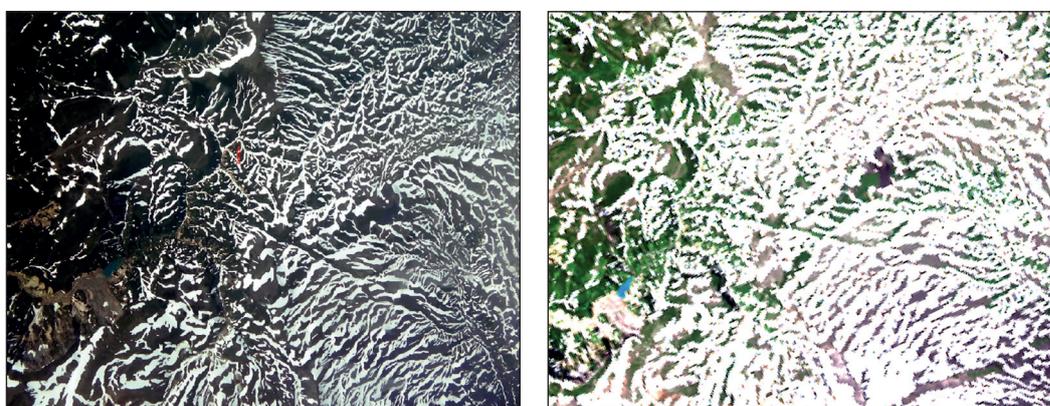


Рис. 6. Изображение Долины гейзеров, зафиксированное:
а — смартфоном ФСР; *б* — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 1. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ_i для объекта Долина гейзеров, сцена 1

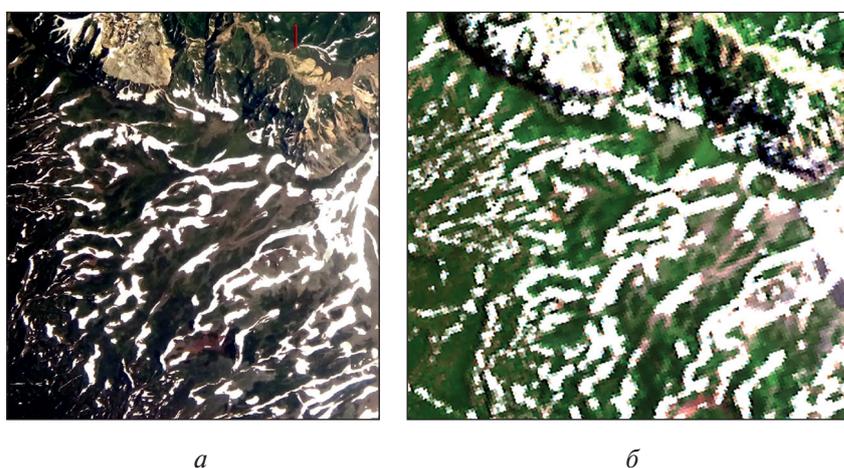
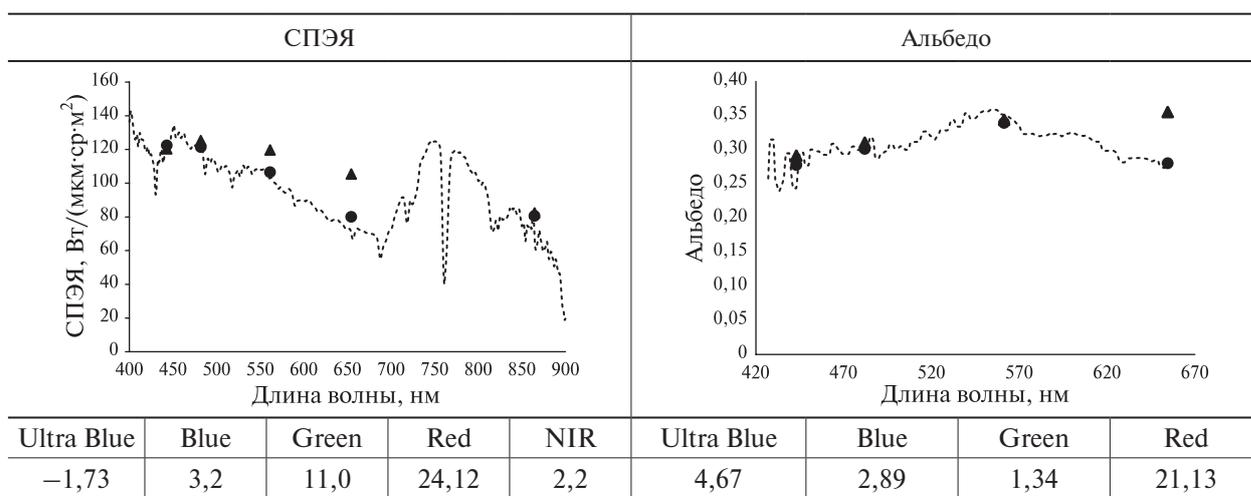


Рис. 7. Изображение Долины гейзеров, зафиксированное: а — смартфоном ФСР; б — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 2. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ_i для объекта Долина гейзеров, сцена 2

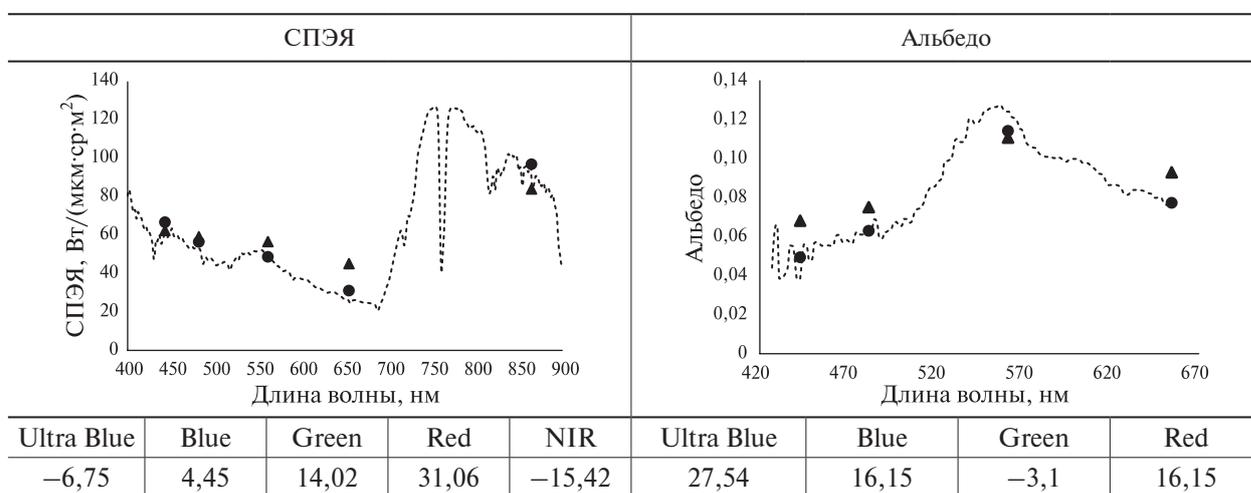
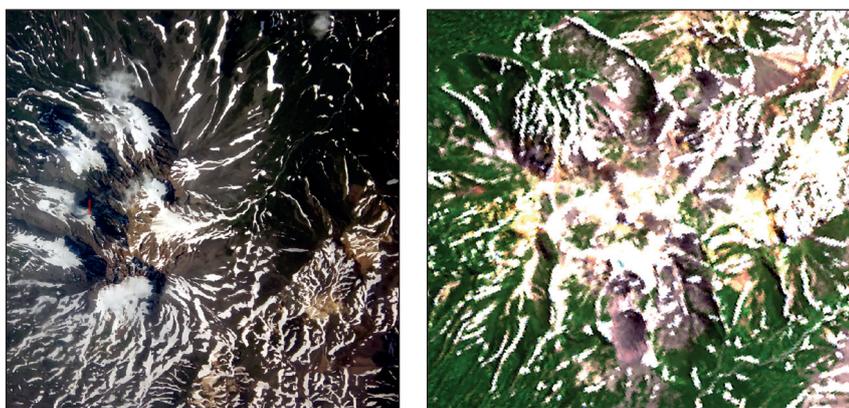




Рис. 8. Вулкан Большой Семячик. Оператор Дубров П. В.

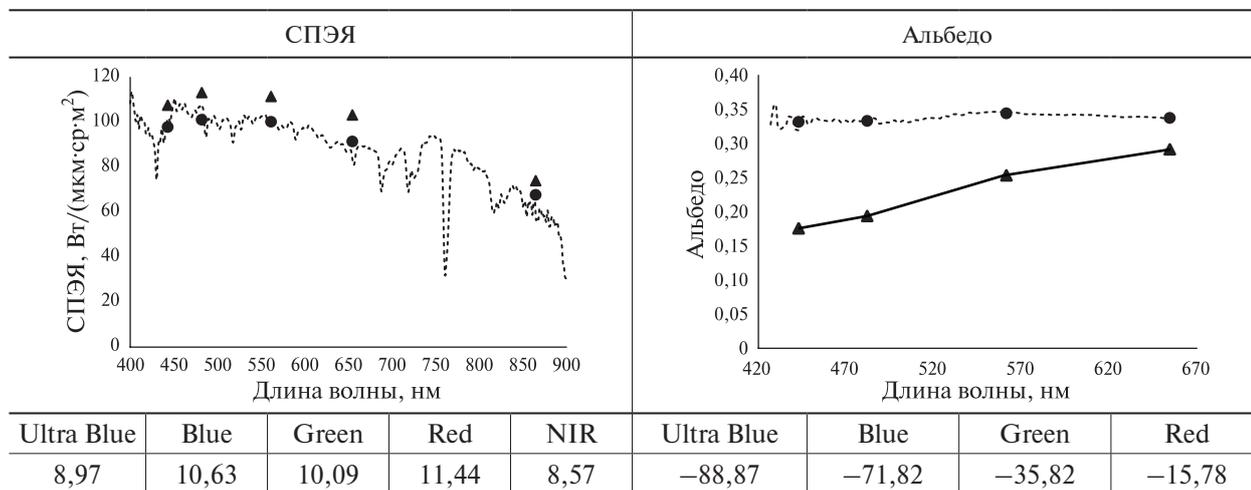


а

б

Рис. 9. Изображение влк. Большой Семячик, зафиксированное: а — смартфоном ФСР; б — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 3. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ_i для объекта Большой Семячик



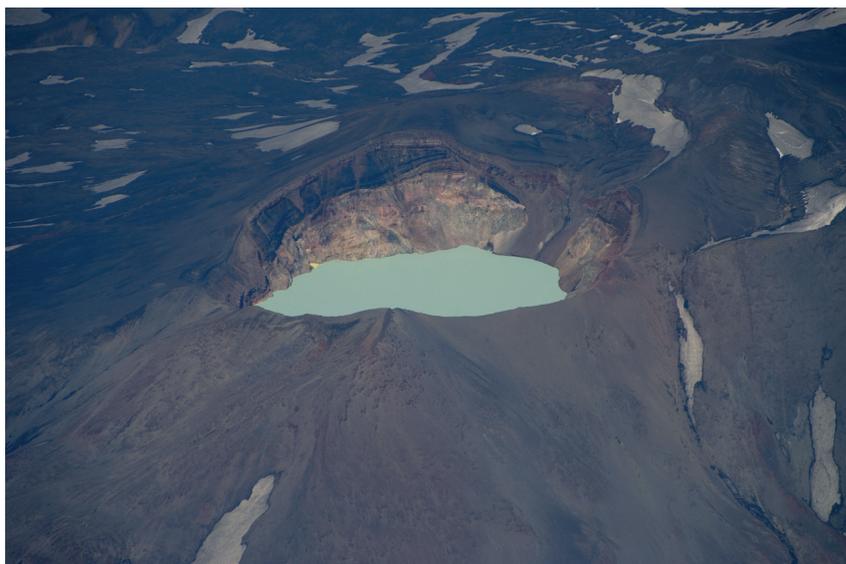
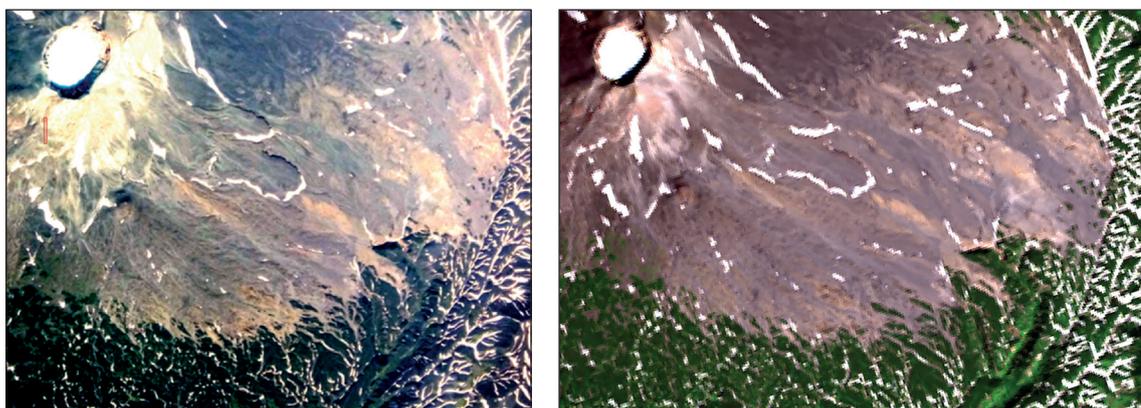


Рис. 10. Вулкан Малый Семячик. Оператор Аймаханов М. Р.



а

б

Рис. 11. Изображение влк. Малый Семячик, зафиксированное: а — смартфоном ФСР; б — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 4. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ_i для объекта Малый Семячек

СПЭЯ					Альbedo			
Ultra Blue	Blue	Green	Red	NIR	Ultra Blue	Blue	Green	Red
-8,86	-3,62	2,17	13,95	-15,85	-32,99	-57,29	-17,25	-0,12

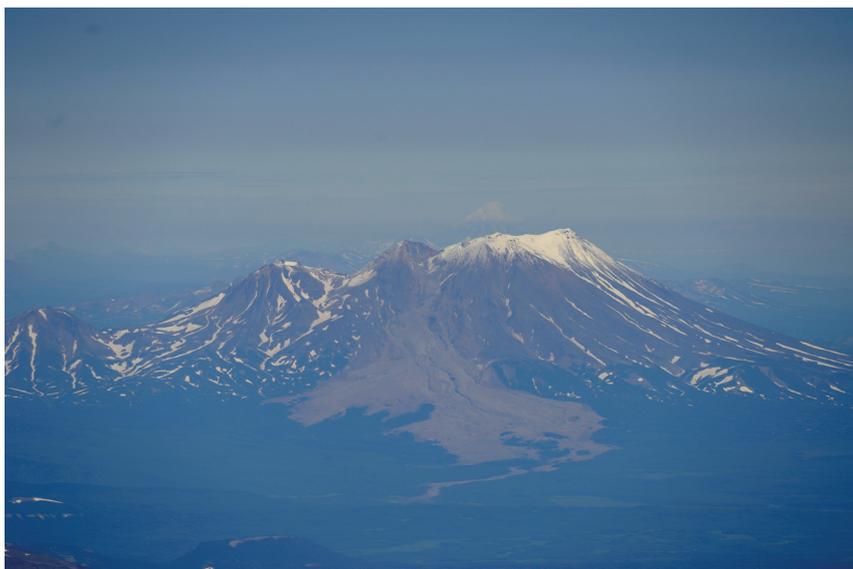


Рис. 12. Вулкан Жупановский. Оператор Дубров П. В.

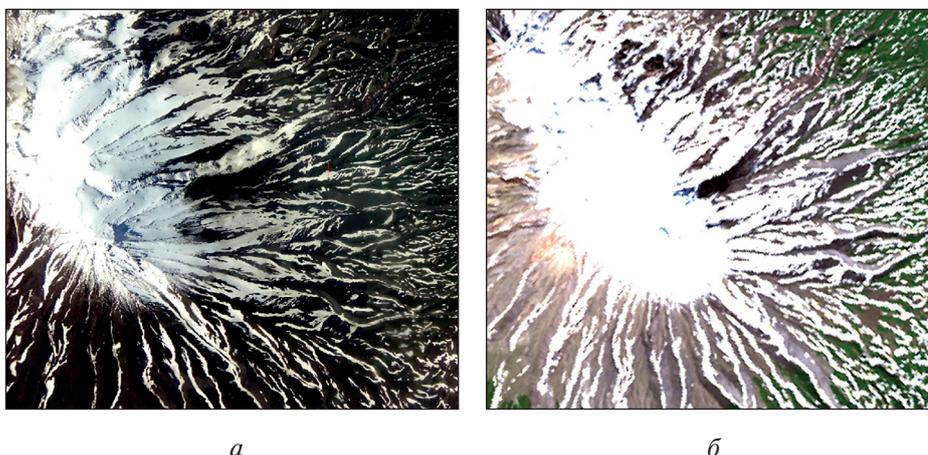
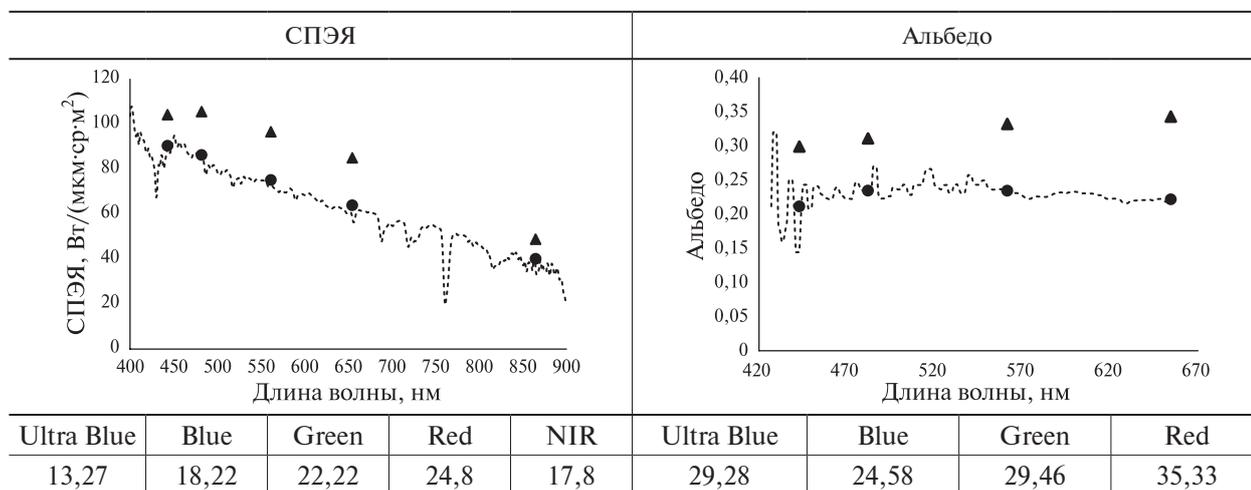


Рис. 13. Изображение влк. Жупановский, зафиксированное:
а — смартфоном ФСР; б — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 5. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ_i для объекта Жупановский



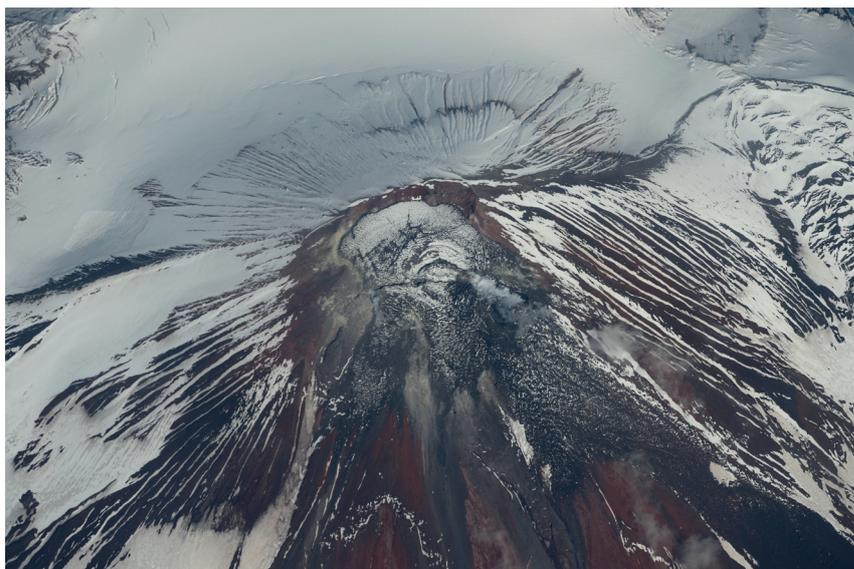


Рис. 14. Вулкан Авачинский. Оператор Кудь-Сверчков С. В.

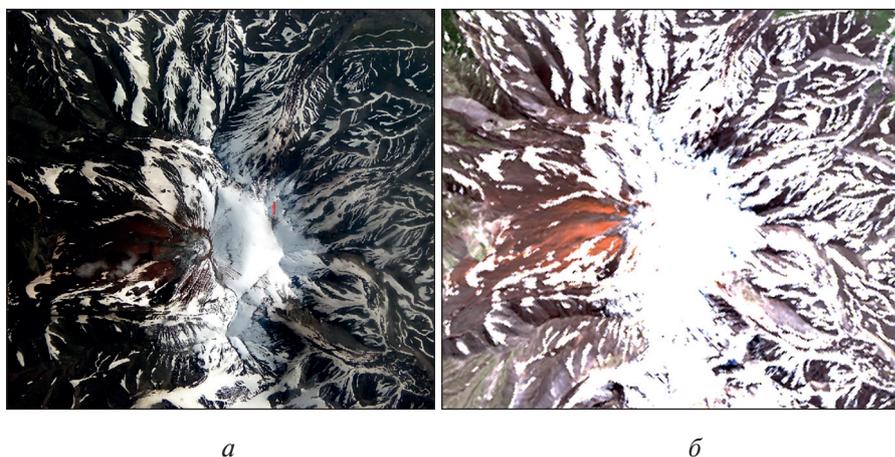
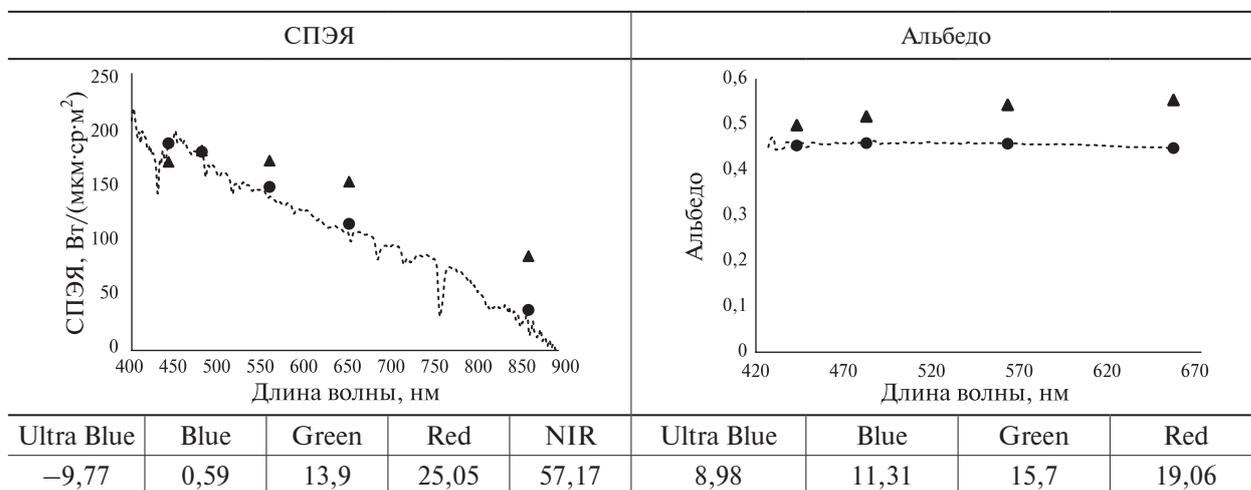


Рис. 15. Изображение влк. Авачинский, зафиксированное: а — смартфоном ФСР; б — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 6. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ , для объекта Авачинский



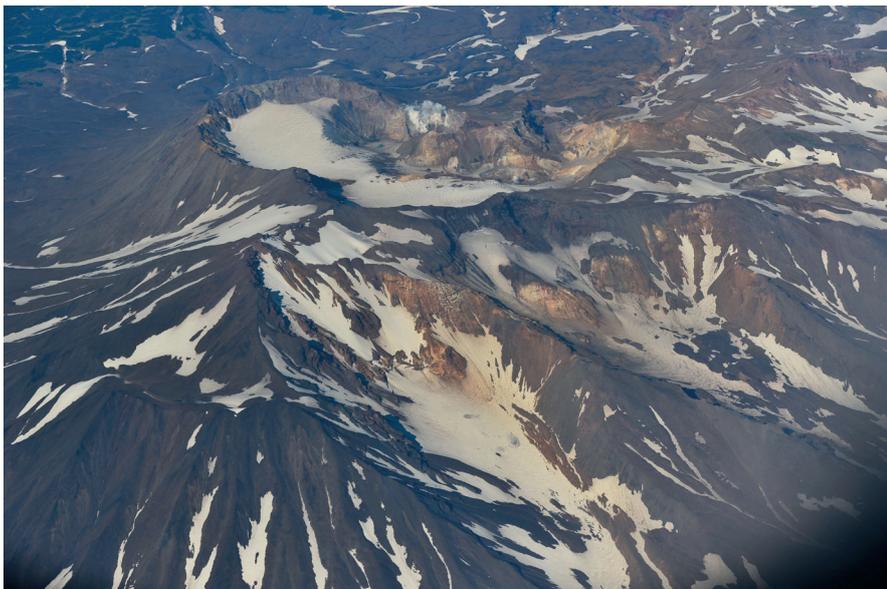


Рис. 16. Вулкан Мутновский. Оператор Корсаков С. В.

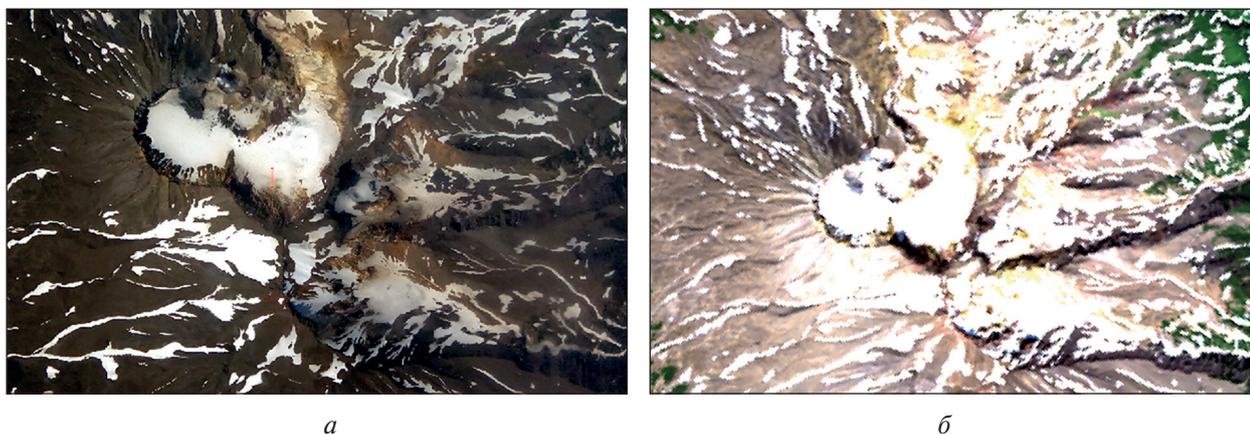
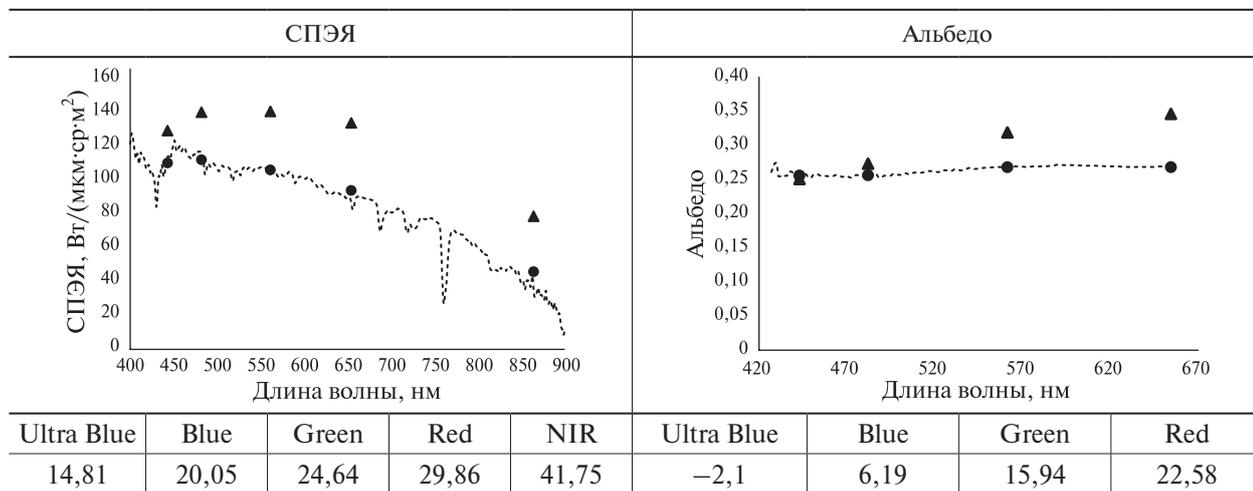


Рис. 17. Изображение влк. Мутновский, зафиксированное:
 а — смартфоном ФСР; б — спутниковым сенсором Landsat-8

Таблица 7. Результаты валидации данных ФСР и Landsat-8 (▲ — значения Landsat-8; ● — значения ФСР, свёрнутые с чувствительностью Landsat-8; точечная линия — исходная функция СПЭЯ/альbedo ФСР) и значения ошибок Δ_i для объекта Мутновский



Средние значения ошибок (по модулю) при верификации по СПЭЯ в каналах OLI составляют соответственно: 9,17; 8,68; 14,0; 22,9 и 22,68 %; при верификации по альбедо: 27,78; 27,17; 16,94 и 18,59 %.

Можно выделить следующие источники возникновения различий измеряемых двумя приборами СПЭЯ и альбедо:

- приборная погрешность ФСР, составляющая не более 5 % (Катковский и др., 2017);
- приборная погрешность Landsat-8, составляющая не более 5 % (Zanter, 2019);
- возможные ошибки при привязке положения щели на изображении ФСР (соответственно, влияние на привязку и выбор пикселей изображения Landsat-8), несоответствие пространственного разрешения Landsat-8 и спектрометрируемой области ФСР;
- неучтённые различия в условиях получения спектров (например, угол съёмки; в данном исследовании полагалось, что все измерения производятся в надири);
- методические погрешности, связанные с пересчётом авиационных спектров на верхнюю границу атмосферы, и погрешности атмосферной коррекции; обе указанные погрешности могут в отдельных случаях (в зависимости от подстилающей поверхности) достигать до 10 %.

Таким образом, проведена обработка спектров и изображений, полученных при съёмке вулканов Камчатского п-ва с борта самолёта-лаборатории Ту-134ЛК в августе 2018 г. в ходе подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений и работе с научной аппаратурой космического эксперимента «Ураган» (Belyaev et al., 2018). В результате проведённой верификации самолётных и спутниковых (Landsat-8) измерений можно сделать вывод, что данные, полученные ФСР, являются достоверными, поскольку различия эффективных СПЭЯ ФСР и Landsat-8 по одним и тем же подстилающим поверхностям при квазисинхронных измерениях находятся в пределах суммарных неопределённостей, определяемых точностью абсолютных энергетических калибровок сенсоров (порядка 5–10 %), а оставшаяся часть погрешностей может объясняться указанными выше факторами.

Полученное хорошее соответствие авиационных спектров и измерений Landsat-8 говорит о том, что зарегистрированные спектры вулканов Камчатского п-ва представляют ценную информацию, которую можно использовать для исследования вулканов, в частности для поиска целевых объектов (адаптивной фильтрации) при тематической обработке как гиперспектральных, так и мультиспектральных космических изображений привулканических территорий различного пространственного разрешения.

В НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ имеется каталог наземных спектров отражения вулканов Камчатки и Курильских островов и различных типов прилегающей поверхности, снятых во время летних экспедиций 2016–2017 гг. По этим наземным спектрам, используя их как эталонные, можно провести поиск состава «смешанных» авиационных или космических спектров (их декомпозицию) и затем выполнить по снимкам высокого пространственного разрешения классификацию территорий вблизи вулканов с целью определения площадей различных объектов (например, лавы, пепла и пр.), что представляет тему отдельной статьи.

Литература

1. Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваяев Д. Ю., Легостаев В. П., Разянцев В. В., Юрина О. А. Особенности проведения и использования результатов съёмки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2015. № 1. С. 17–30.
2. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э., Гусев В. Ф., Десинов Л. В., Иванов В. А., Крот Ю. А., Мартинов А. О., Рязанцев В. В., Сосенко В. А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видео-спектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2016. № 2(13). С. 70–79.
3. Катковский Л. В., Беляев Б. И., Сосенко В. А., Абламейко С. В. Аппаратно-программный комплекс «Калибровка» для наземного спектрометрирования подстилающей поверхности и атмосферы // Материалы 7-го Белорусского космич. конгресса. Минск. 2017. Т. 2. С. 36–40.

4. Станчик В. В., Хомицевич А. Д. Фотоспектрометри для полевых измерений спектров отражения объектов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы 4-й Международ. научно-практ. конф. Минск. 11–12 мая 2017. Минск: НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, 2017. С. 145–147.
5. Belyaev M. Y., Cheremisin M. V., Esakov A. M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment // 69th Intern. Astronautical Congress (IAC). Bremen, Germany, 2018. IAC-18.B3.3.4. P. 1–9.
6. Katkovsky L. V., Martinov A., Siliuk V. A., Ivanov D., Kokhanovsky A. A. (2018a) Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data // Remote Sensing. 2018. V. 10(11). P. 1698. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10111698>.
7. Katkovsky L. V., Martenov A., Siliuk V. A., Ivanov D. (2018b) SHARC method for fast atmospheric correction method for hyperspectral data // Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII: Proc. SPIE Remote Sensing. Berlin, Germany. 2018. V. 10786. DOI: 10.1117/12.2323455.
8. Zanter K. Landsat-8 (L8) Data Users Handbook: Version 4.0. U. S. Geological Survey. Department of the Interior. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019. 115 p. URL: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook_v4.pdf.

Comparison of airborne and satellite measurements of Kamchatka volcanoes spectral reflectance

M. Yu. Belyaev¹, L. V. Katkovsky², V. A. Siliuk², B. I. Belyaev²,
S. I. Bruchkovskaya², D. A. Ivanov², A. M. Esakov¹, V. E. Fokin³

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev 141070, Russia
E-mail: post@rsce.ru

² A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk 220045, Republic of Belarus
E-mail: remsens@mail.ru

³ Yu. A. Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center
Star City, Moscow Region 141160, Russia
E-mail: info@gctc.ru

The paper presents the results of comparison of aircraft and spaceborne measurements of reflection spectra of a number of volcanoes and their adjacent areas of the Kamchatka Peninsula. Spaceborne data were obtained from Landsat-8 OLI sensor. Airborne measurements were carried out using a high spectral resolution spectroradiometer FSR from the Tu-134LK aircraft of the Yu. A. Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center as part of cosmonauts training program for performing visual instrumental observations from the International Space Station (ISS), in particular, such space experiments as Uragan, Dubrava and Scenario. Verification of the airborne and satellite data was performed both by spectral values of radiance at the top of the atmosphere, and by the spectral reflectance at the Earth surface. The airborne radiance spectra were recalculated to the top of atmosphere to the conditions of satellite measurements, and atmospheric correction of the airborne spectra was done to obtain the reflectance spectra of the underlying surface. The surface reflectance values in the Landsat-8 atmospheric correction bands were generated using the LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code). In addition, the radiance and reflectance spectra of the surface obtained from the FSR were recalculated into the corresponding average values for the Landsat-8 OLI bands using the relative spectral sensitivities of the OLI bands.

Keywords: Kamchatka volcanoes, reflection spectra, airborne measurements, satellite data, atmospheric correction

Accepted: 18.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-115-129

References

1. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Legostaev V. P., Ryazantsev V. V., Yurina O. A., Osobennosti provedeniya i ispol'zovaniya rezul'tatov s'emki zemnoi poverkhnosti, vypolnyaemoi ekipazhami rossiiskogo segmenta MKS (Features of imaging the Earth surface and using the results of the imaging made by the ISS Russian segment crews), *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, No. 1, pp. 17–30.
2. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Gusev V. F., Desinov L. V., Ivanov V. A., Krot Yu. A., Martinov A. O., Ryazantsev V. V., Sosenko V. A., Ustroystvo i letnye ispytaniya nauchnoi apparatury "Video-spektral'naya Sistema" na bortu rossiiskogo segmenta MKS (Design and flight tests of science hardware "Video-spectral system" on board the Russian segment of the ISS), *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, No. 2(13), pp. 70–79.
3. Katkovskii L. V., Belyaev B. I., Sosenko V. A., Ablameiko S. V., Apparavno-programmnyi kompleks "Kalibrovka" dlya nazemnogo spektrometrirovaniya podstilayushchei poverkhnosti i atmosfery (Hardware-software complex "Calibration" for ground-based spectrometry of the underlying surface and atmosphere), *Materialy 7-go Belorusskogo kosmicheskogo kongressa* (Proc. 7th Belarusian Space Congress), Minsk, 2017, Vol. 2, pp. 36–40.
4. Stanchik V. V., Khomitsevich A. D., Fotospektrometr dlya polevykh izmerenii spektrov otrazheniya ob'ektov (Photospectroradiometer for field measurements of reflection spectra of objects), *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya: materialy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed Matter Physics: Proc. Conf.), Minsk, 11–12 May 2017, pp. 145–147.
5. Belyaev M. Y., Cheremisin M. V., Esakov A. M., Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment, *69th Intern. Astronautical Congress (IAC)*, Bremen, Germany, 2018, IAC-18.B3.3.4, pp. 1–9.
6. Katkovsky L. V., Martinov A., Siliuk V. A., Ivanov D., Kokhanovsky A. A. (2018a), Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(11), p. 1698, available at: <https://doi.org/10.3390/rs10111698>.
7. Katkovsky L. V., Martenov A., Siliuk V. A., Ivanov D. (2018), SHARC method for fast atmospheric correction method for hyperspectral data, *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII: Proc. SPIE Remote Sensing*, Berlin, Germany, 2018, Vol. 10786, DOI: 10.1117/12.2323455.
8. Zanter K., *Landsat-8 (L8) Data Users Handbook: Version 4.0*, Geological Survey U. S., Department of the Interior, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019, 115 p., URL: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook_v4.pdf.