Спектральные исследования ландшафтов вулкана Ксудач, Южная Камчатка

В. Б. Малышев [1], Б. Н. Фомин [1], Н. С. Озеров [1], Ю. В. Беляев [2], С. И. Гуляева [2]

[1] *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mails: vmalyshev@list.ru, bn-fomin@yandex.ru, nashadr@yandex.ru
[2] *Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ*
Минск, 220045, Беларусь
E-mails: belyv@tut.by, remsens@mail.ru

Проведены гиперспектральные наземные измерения отражательной способности подстилающей поверхности разных типов в вулканически активных зонах южной части п-ова Камчатка на вулканическом массиве Ксудач (спектральное разрешение 2 нм, в диапазоне 256–920 нм). Широкая вариабельность ландшафтов и типов подстилающей поверхности в геодинамически активном районе позволила получить представительный массив данных, характеризующих их предметно-специфические признаки и спектральные характеристики основных элементов поверхности природных ландшафтов. Спектральные измерения выполнены фотоспектрорадиометром ФСР-03, разработанным в отделе аэрокосмических исследований Института прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ) (Минск, Республика Беларусь). Одновременно со спектральными измерениями проведены комплексные геологические и геоэкологические исследования, которые включали описание и отбор растительных и геологических образцов. Работы позволили создать обучающую выборку спектральных характеристик поверхностей природных ландшафтов. Анализ выборки показал, что по характерным формам кривых спектральной яркости статистически надёжно идентифицируются данные типы поверхностей, что позволяет их использовать для объектно-ландшафтного дешифрирования космических гиперспектральных данных, полученных гиперспектрометром Hyperion EO-1 в вулканически активных зонах. В настоящее время остаётся актуальной разработка методов интерпретации гиперспектральной информации для оценки состояния природных и природно-антропогенных систем. Решению проблемы способствует создание баз спектральных данных и их предметно-специфических характеристик. Исследования проведены комплексной экспедицией Института географии РАН (ИГ РАН), Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН и НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ по программе Союзного государства «Мониторинг-СГ» в рамках составной части научно-исследовательской работы ИГ РАН «Мониторинг-СГ 1.3.1.2». Исходные полевые данные загружены в Базу спектральных эталонов (http://spectral.igras.ru).

Ключевые слова: гиперспектральная информация, спектральные эталоны природных поверхностей, спектральные характеристики, фотоспектрорадиометр, природные ландшафты, вулканические массивы, геологические и геоэкологические исследования

Одобрена к печати: 27.10.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-179-194

Введение

Вулканические массивы Южной Камчатки представляют собой пример труднодоступных и сложных территорий для изучения традиционными наземными методами. Проведение полноценного мониторинга таких территорий наиболее эффективно с использованием методов дистанционного зондирования из космоса (Беляев и др., 2019; Гордеев и др., 2015). С целью решения этой задачи Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» планирует запуск на околоземную орбиту серии малых спутников с гиперспектральной съёмочной аппаратурой (Архипов, 2018). Для объектно-ландшафтного дешифрирования гиперспектральной космической информации участков земной поверхности необходимо иметь обучающие выборки эталонов природных объектов (элементов ландшафта) с их

комплексной характеристикой, полученные в наземных условиях (Мальцев, Козинов, 2015; Малышев, Фомин, 2019; Малышев и др., 2021).

Основная цель исследований — создание обучающих выборок по результатам измерений с высоким спектральным разрешением характеристик основных элементов природных ландшафтов в сочетании с их комплексным описанием на тестовых участках, анализ и определение наиболее информативных спектральных зон и диапазонов для идентификации природных ландшафтов.

В работе представлены результаты спектральных исследований характеристик ландшафтных элементов влк. Ксудач на юге п-ова Камчатка. Исследования проводились с 15 по 30 июля 2016 г. комплексной экспедицией в составе специалистов Института географии РАН (ИГ РАН), Научно-исследовательского института прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь) и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) по программе «Мониторинг-СГ» проекта «Мониторинг-СГ-1.3.1.2.» ИГ РАН (в соответствии с техническим заданием договора № 102/2015 от 04.02.2015 между ИГ РАН и ИМГиГ ДВО РАН). Работы выполнялись в местах с активной вулканической деятельностью и на сопредельных территориях. Основой работ стали комплексные геолого-геофизические, геоморфологические, геоэкологические исследования ландшафтных элементов с описанием и отбором растительных материалов для анатомического структурного анализа, а также с измерением спектральных характеристик с высоким спектральным разрешением фотоспектрорадиометром ФСР-03 (Рыбин и др., 2017).

Методы и объекты исследований

Измерения спектральных характеристик спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ, Вт·м$^{-3}$·ср$^{-1}$) ландшафтных элементов влк. Ксудач (со спектральным разрешением 2 нм) проводились полевым однолучевым фотоспектрорадиометром (ФСР-03), разработанным в отделе аэрокосмических исследований НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ. Фотоспектрорадиометр снабжён системой регистрации спектров и изображений на базе смартфона Lenovo S860 с ёмкостным сенсорным экраном, через который осуществляется ручной ввод управляющих команд. Фотокамера, встроенная в смартфон, фиксирует цветное (RGB: R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) фотоизображение спектрометрируемой поверхности. Перед приёмной щелью спектрорадиометра установлен проекционный объектив «МС Гелиос 44-3М». Рабочий спектральный диапазон использованной модели составил 256–920 нм при спектральном разрешении 2 нм (общее число спектральных зон — 332) (Беляев и др., 2016; Бручковская и др., 2017). Спектральная система позволяет синхронно получать спектральную характеристику измеряемой площадки в соответствии с размером входной щели и цветное фотоизображение площадки с регистрацией её географических координат GPS-приёмником (*англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования). Все спектральные измерения проводились при прямом солнечном освещении при высоте солнца не менее 30° над горизонтом.

Геоботаническое описание растительных сообществ в зонах активного вулканизма с помощью параметров, принятых при геоботанических исследованиях (Нешатаева 2002, 2009; Прозина, 1960; Работнов, 1978), выполнено с использованием стандартных методик. На *рис. 1* (см. с. 181) представлено местоположение района работ.

Объекты исследования

Исследования проводились по маршруту: водораздел рек Западная Ходутка – Тёплая, влк. Ксудач (озёра Ключевое и Штюбель).

Отложения влк. Ксудач включают тефру, материал пирокластических потоков и пирокластических волн.

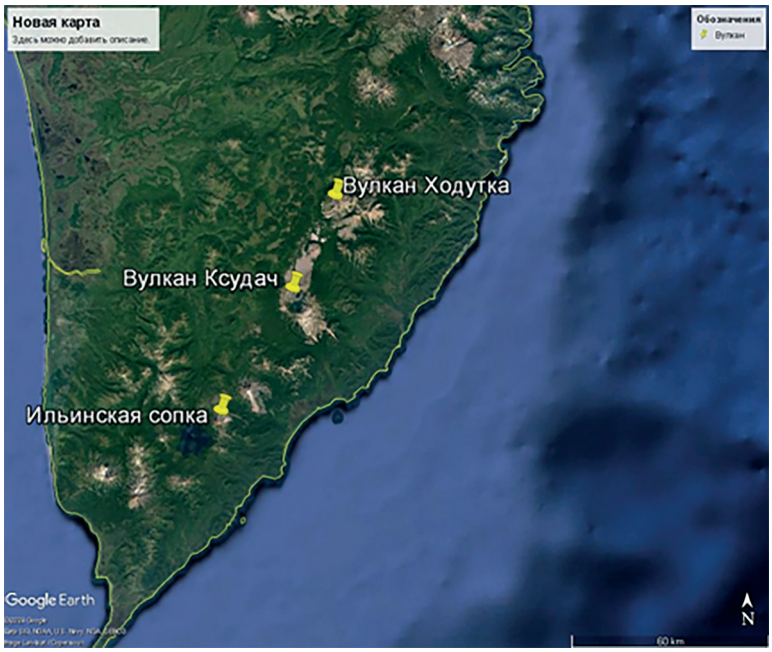

Рис. 1. Местоположение района работ — влк. Ксудач

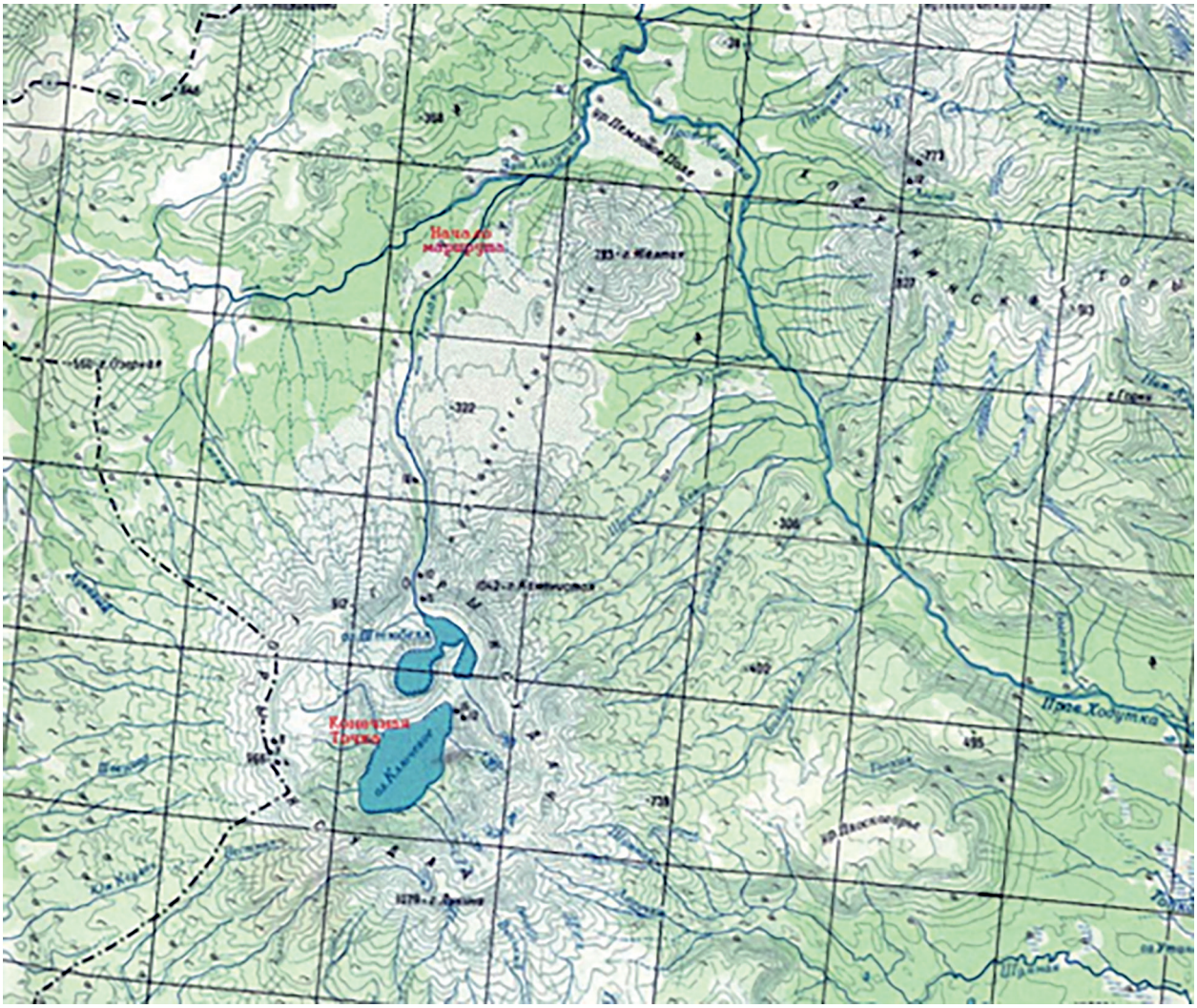

Рис. 2. Район работ

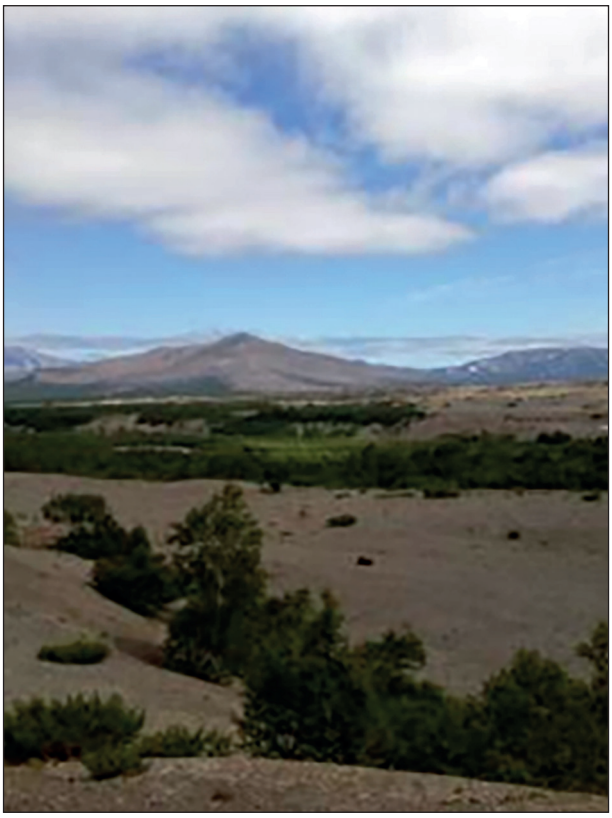

Рис. 3. Общий вид ландшафта. Левый борт р. Тёплой

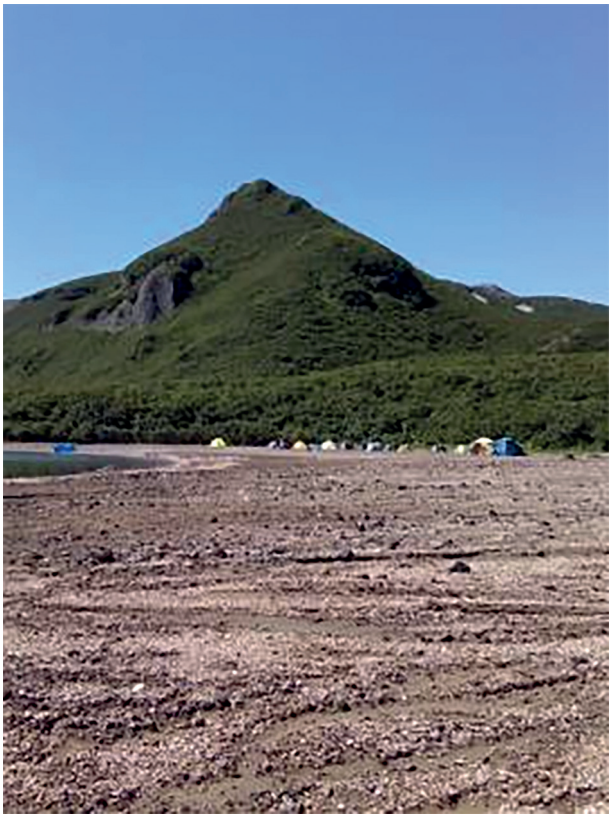

Рис. 4. Западная часть оз. Ключевого. На заднем плане — влк. Ксудач

Отложения пирокластических потоков повсеместно неспёкшиеся. В долине р. Тёплой выделяются четыре единицы потоков, нижние три содержат белую хрупкую пористую пемзу, верхняя — серую и сизовато-серую, более плотную и прочную пемзу.

Тефра вблизи кальдеры представлена пемзовыми бомбами и лапилли. Выделяются четыре горизонта, каждый из которых подстилает отложения «своих» пирокластических потоков. Пемза нижних трёх горизонтов — белая и желтоватая, верхнего — сизо-серая, как и у пирокластических потоков. На *рис. 2* (см. с. 181) отмечены места начала и окончания маршрута при исследованиях влк. Ксудач (район работ).

Водораздел рек Западная Ходутка – Тёплая

Высота эрозионной площадки на водоразделе рек Западная Ходутка – Тёплая составляет 196 м н. у. м. (над уровнем моря). Уплотнённая тефра влк. Ксудач представлена грубым пеплом и лапилли. Характерно мохово-лишайниковое сообщество с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.) при различном проективном покрытии (от 65 до 25 %) и различном сочетании видов и родов. Каждая площадка имеет подробное описание, фотоизображение, привязку по дате и координатам.

Левый борт р. Тёплой в 6,5 км от истоков. Переход на влк. Ксудач

На *рис. 3* показан общий вид ландшафта левого борта р. Тёплой в 6,5 км от истоков. Высота — 300 м, вид — на северо-восток. На переднем плане — пирокластический чехол, частично переотложенный ветровой эрозией. Зелёная полоса в центре — долина р. Правая Ходутка. Слева на дальнем плане — влк. Ходутка. Растительные сообщества не сформированы. Отдельные куртины трав и древесной растительности представлены подростом ольховника и каменной берёзы. Видна верхняя часть пиро-

кластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией. Тефра — дацитового состава извержения влк. Штюбеля 1907 г. Характерно мохово-лишайниковое сообщество с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.).

Западная часть оз. Ключевого перед влк. Ксудач

На *рис. 4* (см. с. 182) показан ландшафт западной части оз. Ключевого. На заднем плане — влк. Ксудач, на переднем плане — пляж в тыловой части бух. Лагерной, представленный вулканическими песками с бурым глинистым матриксом, редко — пемзовой галькой светло-серого и кирпично-красного цвета. Остатки древесной растительности — сухие ветви. Грубые вулканические пески светло-серого цвета с редкими обломками пемз, андезитов и гидротермально изменённых пород. В затопленном бенче бухты — пески вулканические, грубозернистые с облаками андезита, пемза, глыбы андезитов, фрагменты вулканических бомб.

Западная часть оз. Ключевого. Устье ручья Чёрного

На *рис. 5* показан ландшафт западной части оз. Ключевого в районе устья ручья Чёрного. В нижней части — озёрная терраса, покрытая растительностью. В центре — лавово-экструзивный комплекс кальдеры Ксудач V. Береговые склоны покрыты ольховником кустарниковым (*Duschekia fruticosa*) высокотравно-вейниковым.

Результаты и обсуждение

В ходе полевых работ выделено и обследовано 8 наиболее контрастных элементов ландшафта в районе влк. Ксудач.

I. Мохово-лишайниковая растительность эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая, сформированной уплотнённой тефрой влк. Ксудач, грубым пеплом и лапилли. Высота эрозионной площадки — 196 м н. у. м. Мохово-лишайниковое сообщество с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.). Проективное покрытие от 25 до 65 %. На *рис. 6* (см. с. 184) приведены фотоизображения 10 тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) представлены на *рис. 7* (см. с. 184). Нумерация кривых СПЭЯ на всех рисунках соответствует фотоизображениям тестовых участков (см. *рис. 6*, *слева направо*: изображение первого участка — кривая СПЭЯ 1 и т. д.)

Рис. 5. Фотоизображение места расположения тестовых площадок спектральных измерений в западной части оз. Ключевого в районе устья ручья Чёрного

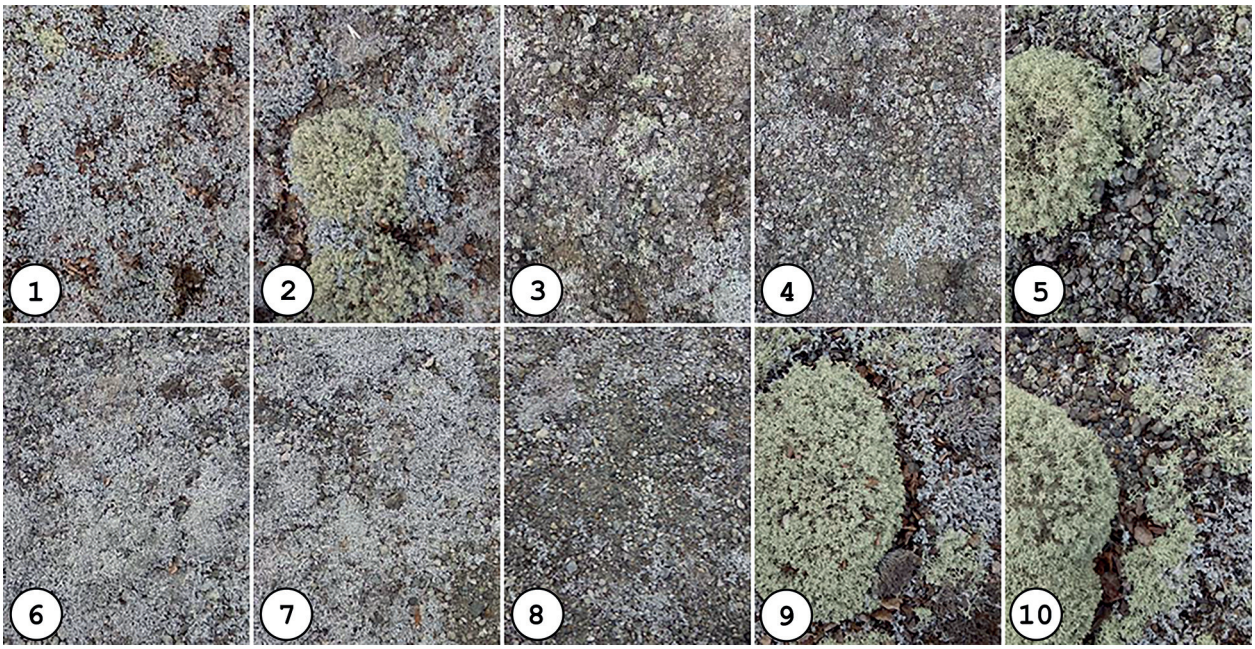

Рис. 6. Фотоизображения 10 тестовых площадок с мохово-лишайниковой растительностью эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.) на высоте 196 м н. у. м.

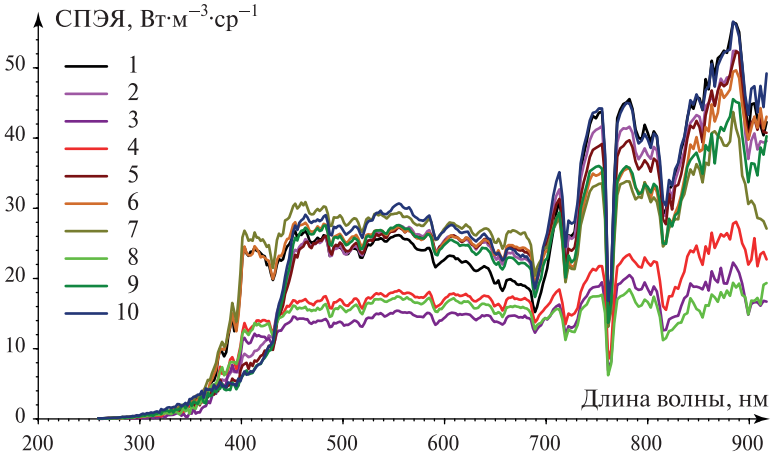

Рис. 7. Кривые СПЭЯ 10 тестовых участков (см. *рис. 6*) с мохово-лишайниковой растительностью эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.) на высоте 196 м н. у. м.

На основе спектральных характеристик в диапазоне 450–650 нм можно выделить два класса растительных сообществ. Все десять образцов могут быть разделены в диапазоне 740–760 нм.

II. Кустарнико-кустарничковая растительность эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая, сформированной уплотнённой тефрой влк. Ксудач, грубым пеплом и лапилли. Высота — 196 м н. у. м. Растительное сообщество сформировано берёзой Эрмана (*Betula ermanii*) и шикшеевыми зарослями (*Empetrum nigrum* с участием *Trientalis europaea*). Проективное покрытие от 55 до 85 %. На *рис. 8* (см. с. 185) приведены фотоизображения 5 тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 9* (см. с. 185).

Кустарнико-кустарничковая растительности по спектральным характеристикам более однозначно различается в интервале 740–760 нм.

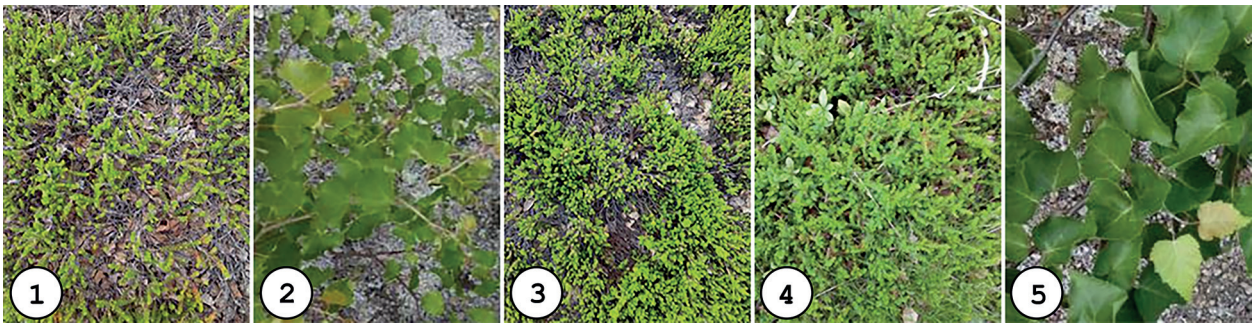

Рис. 8. Фотоизображения 5 тестовых участков кустарнико-кустарничковой растительности из берёзы Эрмана (*Betula ermanii*) и шикши (*Empetrum nigrum* с участием *Trientalis europaea*) на эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая, сформированной уплотнённой тефрой влк. Ксудач, грубым пеплом и лапилли на высоте 196 м н. у. м.

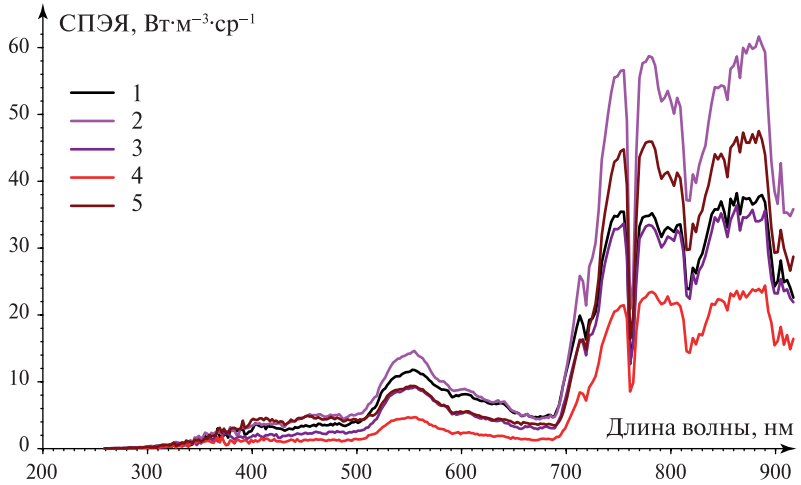

Рис. 9. Кривые СПЭЯ 5 тестовых участков (см. *рис. 8*) кустарнико-кустарничковой растительности из берёзы Эрмана (*Betula ermanii*) и шикши (*Empetrum nigrum* с участием *Trientalis europaea*) на эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая, сформированной уплотнённой тефрой влк. Ксудач, грубым пеплом и лапилли на высоте 196 м н. у. м.

III. Выходы тефры дацитового состава извержения влк. Штюбеля (1907) в верхней части пирокластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией на левом борту р. Тёплой в 6,5 км от истока. Высота — 300 м н. у. м. На *рис. 10* приведены фотоизображения 5 тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 11* (см. с. 186).

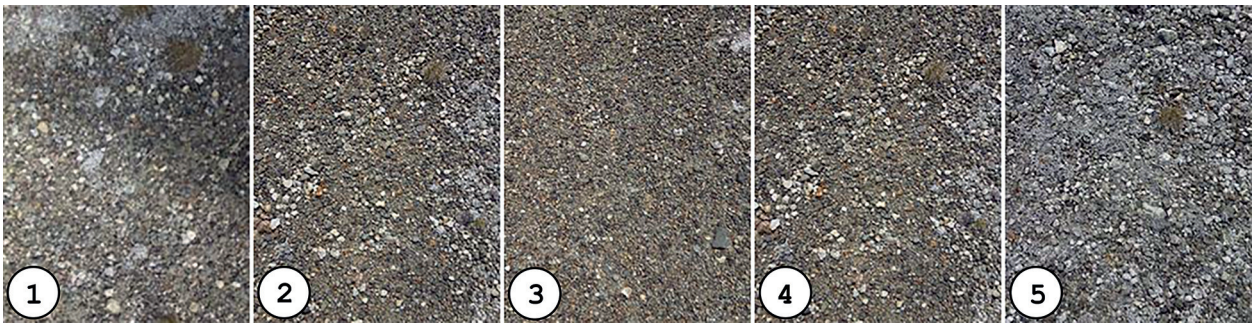

Рис. 10. Фотоизображения 5 тестовых участков выхода тефры дацитового состава извержения влк. Штюбеля (1907) в верхней части пирокластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией на левом борту р. Тёплой в 6,5 км от истока на высоте 300 м н. у. м.

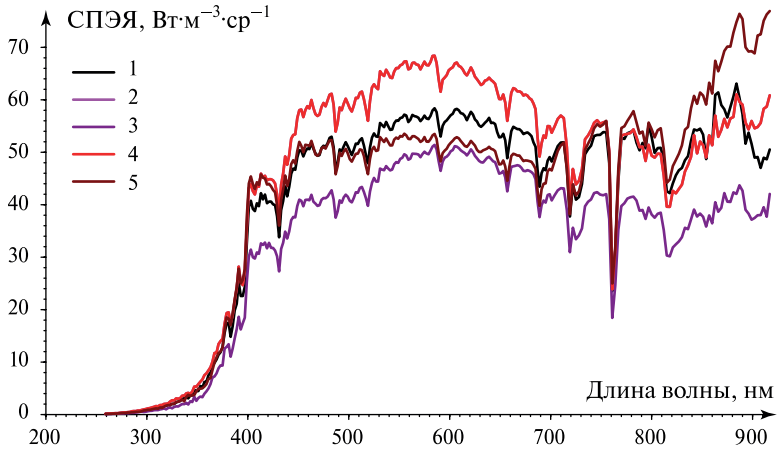

Рис. 11. Кривые СПЭЯ 5 тестовых участков (см. *рис. 10*) выхода тефры дацитового состава извержения влк. Штюбеля (1907) в верхней части пирокластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией на левом борту р. Тёплой в 6,5 км от истока на высоте 30 м н. у. м.

На участках выхода тефры дацитового состава различия спектральных характеристик наблюдаются в диапазоне 450–680 нм.

IV. Тонкозернистые и грубозернистые вулканические пески с бурым глинистым матриксом, с редким включением пемзовой гальки светло-серого и кирпично-красного цвета, а также обломков сухих ветвей древесной растительности на пляже западного побережья оз. Ключевого. На *рис. 12* приведены фотоизображения 7 тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 13* (см. с. 187).

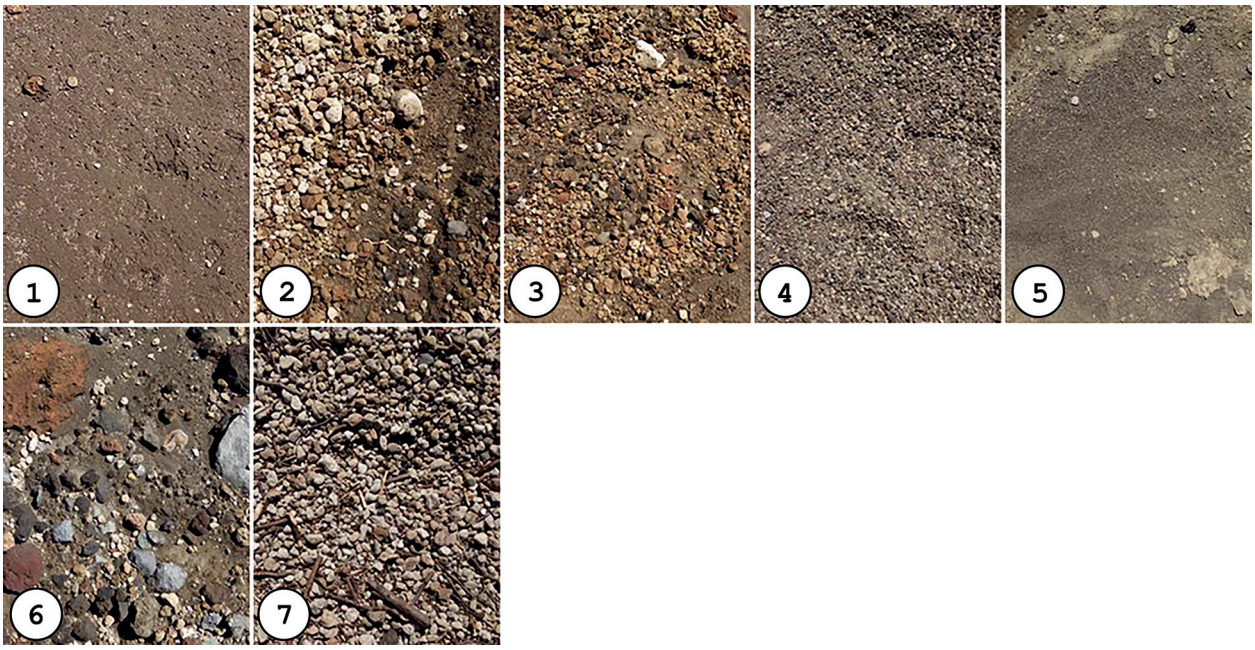

Рис. 12. Фотоизображения 7 тестовых участков тонкозернистых и грубозернистых вулканических песков с бурым глинистым матриксом, с редким включением пемзовой гальки светло-серого и кирпично-красного цвета, а также обломков сухих ветвей древесной растительности на пляже западного побережья оз. Ключевого

На данном участке наиболее информативный диапазон — от 650 до 750 нм.

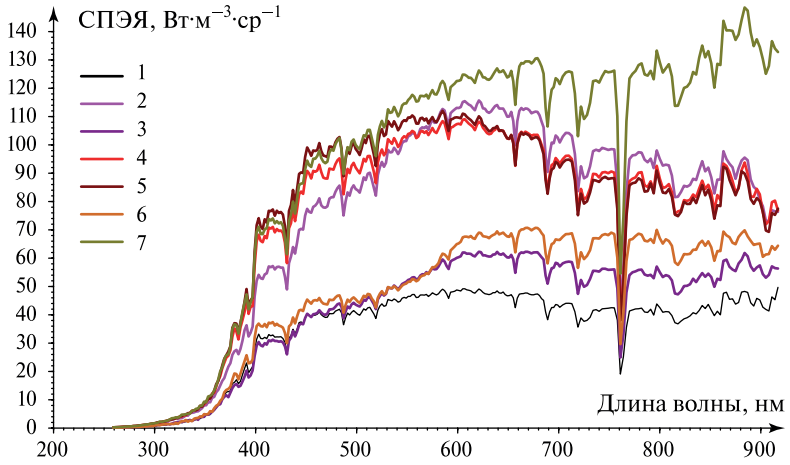

Рис. 13. Кривые СПЭЯ 7 тестовых участков (см. *рис. 12*) тонкозернистых и грубозернистых вулканических песков с бурым глинистым матриксом, с редким включением пемзовой гальки светло-серого и кирпично-красного цвета, а также обломков сухих ветвей древесной растительности на пляже западного побережья оз. Ключевого

V. Затопленный бенч с угловатыми обломками светло-серых андезитов в песчано-глинистом матриксе бух. Лагерной в западной части оз. Ключевого. На *рис. 14* приведены фотоизображения 7 тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 15* (см. с. 188).

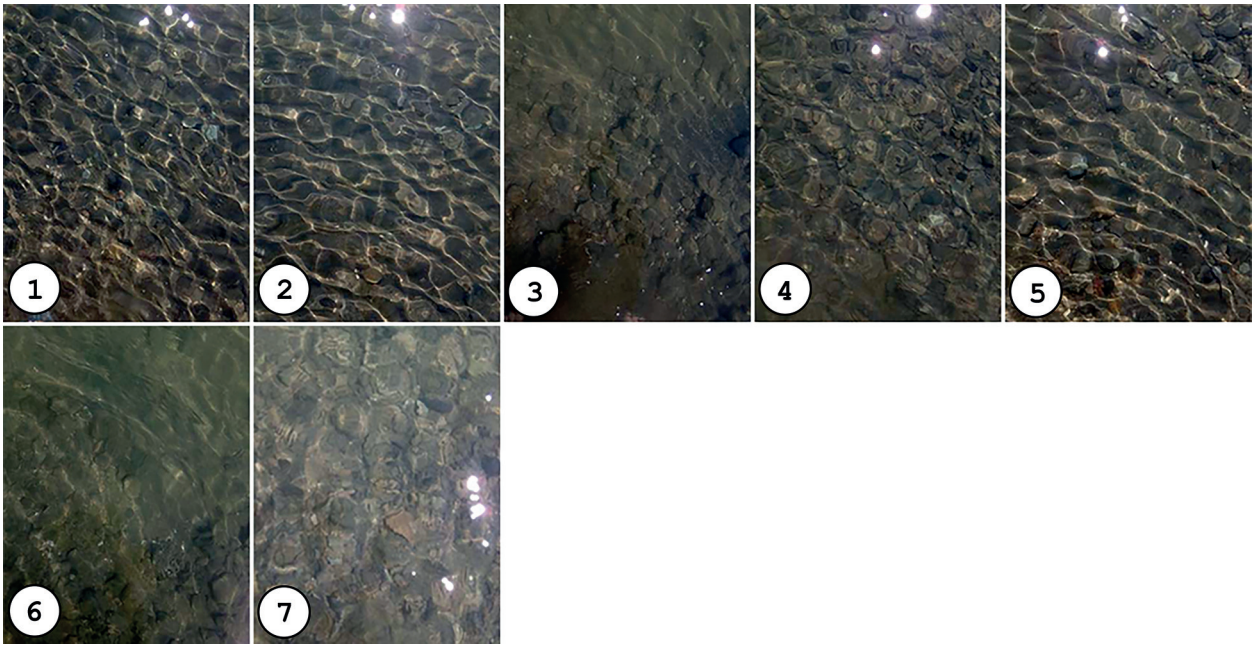

Рис. 14. Фотоизображения 7 тестовых участков затопленного бенча с угловатыми обломками светло-серых андезитов в песчано-глинистом матриксе бух. Лагерной в западной части оз. Ключевого

На данном ландшафте по спектральным характеристикам выделяются два класса поверхностей, а более информативный диапазон лежит в пределах от 500 до 650 нм.

VI. Пески вулканические, грубозернистые с глыбами фрагментов вулканических бомб, красно-бурых и светло-серых андезитов и пемз в конусе выноса ручья Лагерный, 130 м от устья. На *рис. 16* (см. с. 188) приведены фотоизображения 4 тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 17* (см. с. 188).

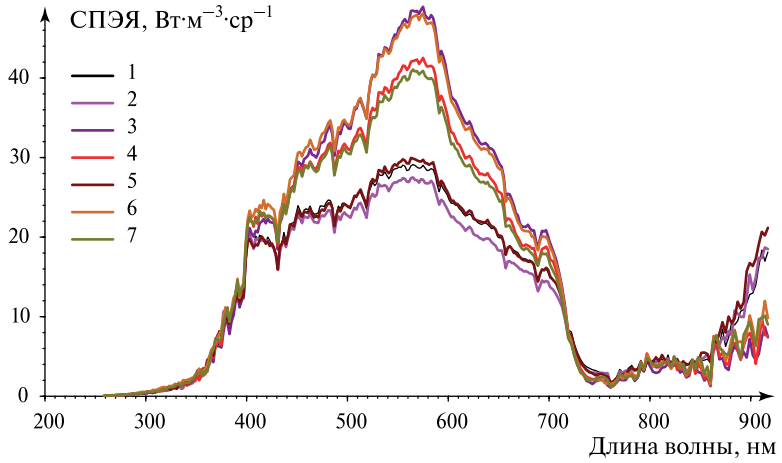

Рис. 15. Кривые СПЭЯ 7 тестовых участков (см. *рис. 14*) затопленного бенча с угловатыми обломками светло-серых андезитов в песчано-глинистом матриксе бух. Лагерной в западной части оз. Ключевого

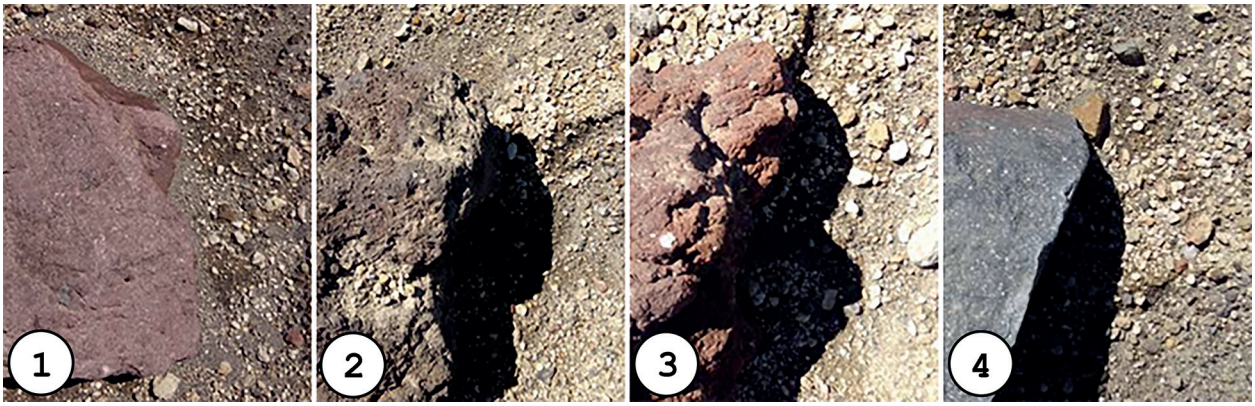

Рис. 16. Фотоизображения 4 тестовых участков вулканических песков, грубозернистых с глыбами фрагментов вулканических бомб, красно-бурых и светло-серых андезитов и пемз в конусе выноса ручья Лагерный, 130 м от устья

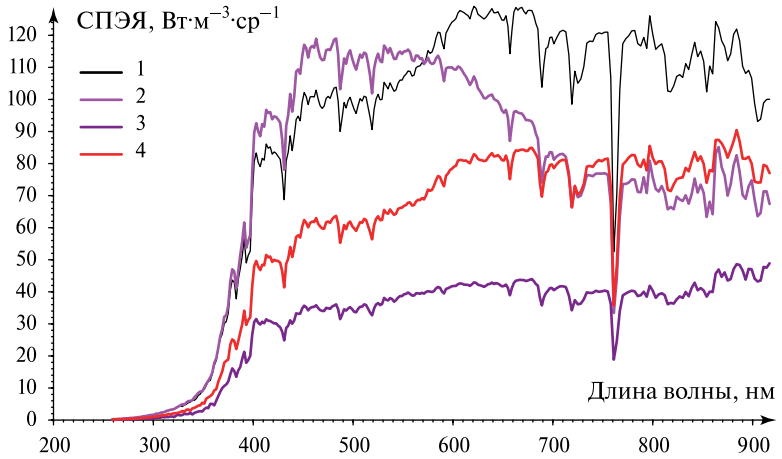

Рис. 17. Кривые СПЭЯ 4 тестовых участков (см. *рис. 16*) вулканических песков, грубозернистых с глыбами фрагментов вулканических бомб, красно-бурых и светло-серых андезитов и пемз в конусе выноса ручья Лагерный, 130 м от устья

Элементы ландшафта по спектральным характеристикам наиболее определённо различаются в диапазоне от 400 до 650 нм.

VII. Заросли ольховника (*Duschekia fruticosa*) и полыни пышной (*Artemisia opulenta*) с проективным покрытием в период вегетации до и после цветения от 65 до 90 % на конусах выноса и пирокластических чехлах из тефры андезидацитового состава. На *рис. 18* приведены фотоизображения двух тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 19*.

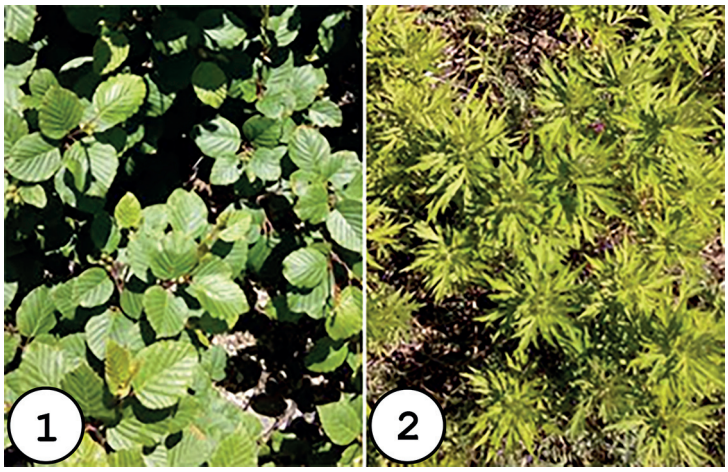

Рис. 18. Фотоизображения двух тестовых участков зарослей ольховника (*Duschekia fruticosa*) и полыни пышной (*Artemisia opulenta*) в период вегетации до и после цветения с проективным покрытием от 65 до 90 % на конусах выноса и пирокластических чехлах из тефры андезидацитового состава

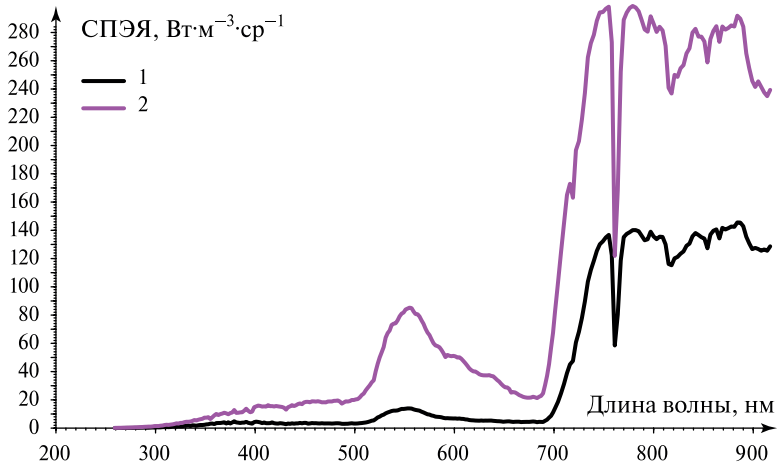

Рис. 19. Кривые СПЭЯ 2 тестовых участков (см. *рис. 18*) зарослей ольховника (*Duschekia fruticosa*) и полыни пышной (*Artemisia opulenta*) в период вегетации до и после цветения с проективным покрытием от 65 до 90 % на конусах выноса и пирокластических чехлах из тефры андезидацитового состава

В случае со спектральными характеристиками растительности различия наблюдаются во всём диапазоне от 400 нм.

VIII. Пирокластический чехол из тефры андезидацитового состава с редкими обломками (3–7 см) угловатых светло-серых и красноватых андезитов, с несомкнутыми группировками из остролодочника завёрнутого (*Oxytropis revoluta*) и полыни скученной (*Artemisia glomerata*) с проективным покрытием в фенофазе полного цветения менее 1 % на северо-западном и юго-западном склонах влк. Штюбеля (1907) в диапазоне высот 431–436 м. н. у. м. На *рис. 20* (см. с. 190) приведены фотоизображения двух тестовых участков данного ландшафта, на которых проводились спектральные измерения. Полученные кривые СПЭЯ представлены на *рис. 21* (см. с. 190).

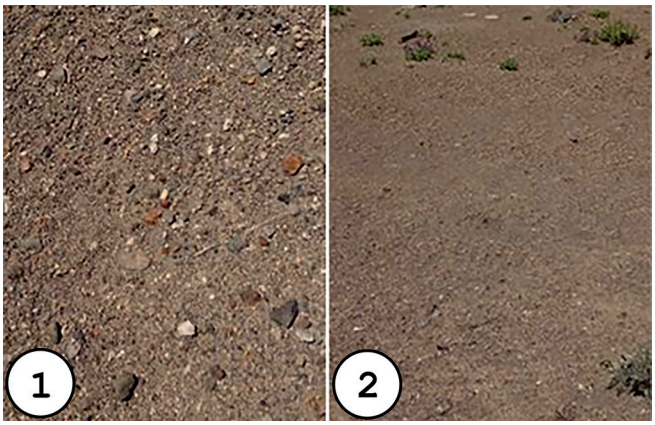

Рис. 20. Фотоизображения двух тестовых участков пирокластического чехла из тефры андезидацитового состава с редкими обломками (3–7 см) угловатых светло-серых и красноватых андезитов, с несомкнутыми группировками из остролодочника завёрнутого (*Oxytropis revoluta*) и полыни скученной (*Artemisia glomerata*) в фенофазе полного цветения с проективным покрытием менее 1 % на северо-западном и юго-западном склонах влк. Штюбеля (1907) в диапазоне высот 431–436 м н. у. м.

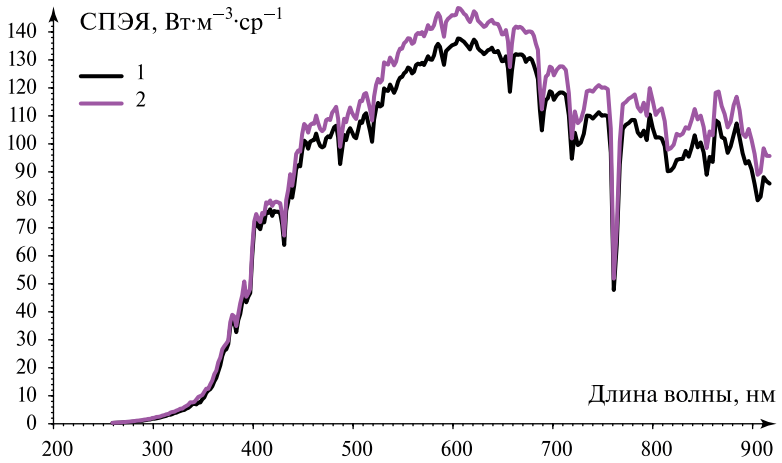

Рис. 21. Кривые СПЭЯ двух тестовых участков (см. *рис. 20*) пирокластического чехла из тефры андезидацитового состава с редкими обломками (3–7 см) угловатых светло-серых и красноватых андезитов, с несомкнутыми группировками из остролодочника завёрнутого (*Oxytropis revoluta*) и полыни скученной (*Artemisia glomerata*) в фенофазе полного цветения с проективным покрытием менее 1 % на северо-западном и юго-западном склонах влк. Штюбеля (1907) в диапазоне высот 431–436 м н. у. м.

На *рис. 22* (см. с. 191) приведены средние кривые СПЭЯ для каждого вида ландшафта.

Выводы и заключение

Проведённые исследования показали наиболее эффективные спектральные диапазоны и зоны для идентификации ландшафтов вулканических активных зон и проведения объектно-ландшафтного дешифрирования и мониторинга состояний на основе гиперспектральной космической информации. Выделенные спектральные интервалы соответствуют материалам, полученным при выделении различных видов пирокластических образований северной группы вулканов Камчатки (Гордеев и др., 2015).

Полученные данные позволяют сформировать обучающие выборки спектральных эталонов природных объектов (элементов ландшафта) вулканически активных зон с их комплексными характеристиками, которые внесены в Базу спектральных эталонов (http://spectral.igras.ru) (Малышев, Фомин, 2019).

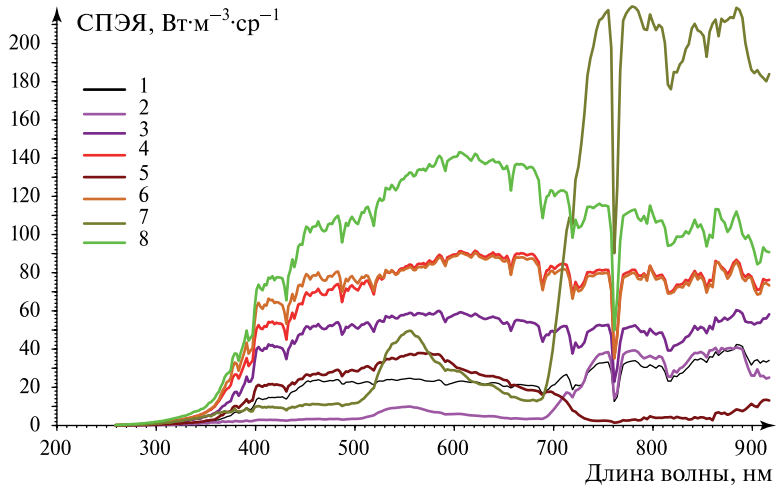

Рис. 22. Средние кривые СПЭЯ обследованных ландшафтов: 1 — мохово-лишайниковая растительность эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая, сформированной уплотнённой тефрой влк. Ксудач, грубым пеплом и лапилли на высоте 196 м н. у. м.; 2 — кустарнико-кустарничковая растительность эрозионной поверхности водораздела рек Западная Ходутка – Тёплая, сформированной уплотнённой тефрой влк. Ксудач, грубым пеплом и лапилли на высоте 196 м н. у. м.; 3 — выходы тефры дацитового состава извержения влк. Штюбеля (1907) в верхней части пирокластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией на левом борту р. Тёплой в 6,5 км от истока на высоте 300 м н. у. м.; 4 — тонкозернистые и грубозернистые вулканические пески с бурым глинистым матриксом, с редким включением пемзовой гальки светло-серого и кирпично-красного цвета, а также обломков сухих ветвей древесной растительности на пляже западного побережья оз. Ключевого; 5 — затопленный бенч с угловатыми обломками светло-серых андезитов в песчано-глинистом матриксе бух. Лагерной в западной части оз. Ключевого; 6 — пески вулканические, грубозернистые с глыбами фрагментов вулканических бомб, красно-бурых и светло-серых андезитов и пемз в конусе выноса ручья Лагерный, 130 м от устья; 7 — заросли ольховника (*Duschekia fruticosa*) и полыни пышной (*Artemisia opulenta*) в период вегетации до и после цветения с проективным покрытием от 65 до 90 % на конусах выноса и пирокластических чехлах из тефры андезидацитового состава; 8 — пирокластический чехол из тефры андезидацитового состава с редкими обломками (3–7 см) угловатых светло-серых и красноватых андезитов, несомкнутыми группировками из остролодочника завёрнутого (*Oxytropis revoluta*) и полыни скученной (*Artemisia glomerata*) в фенофазе полного цветения с проективным покрытием менее 1 % на северо-западном и юго-западном склонах влк. Штюбеля (1907) в диапазоне высот 431–436 м н. у. м.

Работа выполнена по программе Союзного государства «Мониторинг-СГ» проекта ИГ РАН «Мониторинг-СГ-1.3.1.2», а также в рамках темы государственного задания № АААА-А19-119022190168-8.

Авторы благодарят специалистов ИМГиГ ДВО РАН за проведение комплексных геолого-геофизических, геоморфологических и геоэкологических исследований характеристик ландшафтов и описание тестовых площадок спектральных измерений.

Литература

1. *Архипов С. А.* Исследование требований к перспективной оптико-электронной аппаратуре для малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2018. № 1. С. 155–162.
2. *Беляев Ю. В.*, *Бручковская С. И.*, *Литвинович С. Г.*, *Крот Ю. В.*, *Мартинов А. О.*, *Пасенюк А. А.*, *Малышев В. Б.* Результаты измерений спектральных характеристик спектрорадиометром ФСР на полуострове Камчатка // Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Международ. научно-практ. конф. Минск: НИИПФП, 2016. С. 34–38.
3. *Беляев М. Ю.*, *Катковский Л. В.*, *Силюк О. О. и др.* Сравнение спектральных характеристик отражения вулканов Камчатки по данным авиационных и спутниковых измерений // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 115–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-115-129.
4. *Бручковская С. И.*, *Литвинович Г. С.*, *Малышев В. Б.* Результаты измерений спектрорадиометров ФСР и ДМС комплекса АПК «Калибровка» // Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Международ. научно-практ. конф. Минск: НИИПФП, 2017. С. 37–40.
5. *Гордеев Е. И.*, *Гирина О. А.*, *Лупян Е. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Уваров И. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Мельников Д. В.*, *Маневич А. Г.*, *Сорокин А. А.*, *Верхотуров А. Л.*, *Романова И. М.*, *Крамарева Л. С.*, *Королев С. П.* Изучение продуктов извержений вулканов Камчатки с помощью гиперспектральных спутниковых данных в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 113–128.
6. *Мальцев Г. Н.*, *Козинов И. А.* Создание и использование баз данных спектральных образов для решения задач тематической обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2015. № 1. С. 24–31.
7. *Малышев В. Б.*, *Фомин Б. Н.* Децентрализованная база данных спектральных характеристик и параметров объектов земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 53–65. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-53-65.
8. *Малышев В. Б.*, *Беляев Ю. В.*, *Бручковская С. И.* Спектральные исследования ландшафтов Ходуткинского вулканического массива, Южная Камчатка // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 103–115. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-103-115.
9. *Нешатаева В. Ю.* Растительность Южно-Камчатского заказника // Флора и растительность Южной Камчатки: на примере Южно-Камчатского государственного заказника: Труды / под ред. В. Ю. Нешатаевой. Петропавловск-Камчатский, 2002. Вып. 3. С. 137–232.
10. *Нешатаева В. Ю.* Растительность полуострова Камчатка. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2009. 537 с.
11. *Прозина М. Н.* Ботаническая микротехника. М.: Высш. шк., 1960. 206 с.
12. *Работнов Т. А.* Фитоценология: учебное пособие для биологических факультетов вузов. М.: Изд-во МГУ, 1978. 384 с.
13. *Рыбин А. В.*, *Богомолов Л. М.*, *Копанина А. В.*, *Дегтерев А. В.*, *Чибисова М. В.*, *Жарков Р. В.*, *Козлов Д. Н.*, *Власова И. И.*, *Коротеев И. Г.*, *Климанцов И. М.*, *Романюк Ф. А.*, *Лебедева Е. В.*, *Беляев Ю. В.*, *Пасенюк А. А.*, *Королев А. Н.*, *Коровин Г. В.*, *Павлов С. В.*, *Кириллов И. А.* Международная экспедиция «Камчатка-2016» // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2017. № 1. С. 141–148.

Spectral studies of landscapes of the Ksudach volcano, South Kamchatka

V. B. Malyshev [1], B. N. Fomin [1], N. S. Ozerov [1], Yu. V. Belyaev [2], S. I. Gulyaeva [2]

[1] *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*
E-mails: vmalyshev@list.ru, bn-fomin@yandex.ru, nashadr@yandex.ru
[2] *A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk 220045, Belarus*
E-mails: belyv@tut.by, remsens@mail.ru

In the volcanically active zones of the southern part of the Kamchatka Peninsula on the Ksudach volcanic massif, hyperspectral ground-based measurements of reflectivity of various types of underlying surfaces (spectral resolution 2 nm, in the range of 256–920 nm) were carried out. The wide variability of landscapes and types of underlying surfaces in the geodynamically active area made it possible to obtain a representative array of data characterizing their subject-specific features and spectral characteristics of the main surface elements of natural landscapes. Spectral measurements were performed by a photospectroradiometer (FSR) developed at the Department of Aerospace Research of A. N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University

(IAPP of BSU, Minsk, Republic of Belarus). Simultaneously with spectral measurements, complex geological and geoecological studies were carried out, which included the description and selection of plant and geological samples. The work made it possible to create a training sample of spectral characteristics of the surfaces of natural landscapes. The analysis of the sample showed that these types of surfaces are statistically reliably identified by the characteristic shapes of spectral brightness curves, which allows them to be used for object-landscape decoding of space hyperspectral data obtained by the Hyperion EO-1 hyperspectrometer in volcanically active zones. Currently, the development of methods for interpreting hyperspectral information for assessing the state of natural and natural-anthropogenic systems remains relevant. The solution of the problem is facilitated by the creation of databases of spectral data and their subject-specific characteristics. The research was carried out during a complex expedition of the Institute of Geography RAS, the Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS and IAPP of BSU under the program of the Union State "Monitoring-SG" as part of the research work of the Institute of Geography RAS "Monitoring-SG 1.3.1.2". The initial field data have been uploaded to the Spectral Reference Database (http://spectral.igras.ru).

Keywords: hyperspectral information, spectral standards of natural surfaces, spectral characteristics, photospectroradiometer, natural landscapes, volcanic massifs. geological and geoecological studies

Accepted: 27.10.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-179-194

References

1. Arkhipov S. A., Examining requirements for prospective optical-electronic apparatus for small spacecraft for remote sensing of the Earth, *Informatsiya i kosmos*, 2018, No. 1, pp. 155–162 (in Russian).
2. Belyaev Yu. V., Bruchkovskaya S. I., Litvinovich S. G., Krot Yu. V., Martinov A. O., Pasenyuk A. A., Malyshev V. B., Results of measurements of spectral characteristics by the FSR spectroradiometer on the Kamchatka peninsula, *Prikladnye problemy optiki*, *radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya* (Applied problems of optics, radiophysics and condensed matter physics), Proc. Intern. Scientific and Practical Conf., Minsk: NIIPFP, 2016, pp. 34–38 (in Russian).
3. Belyaev M. Yu., Katkovsky L. V., Silyuk O. O. et al., Comparison of spectral reflection characteristics of Kamchatka volcanoes according to aviation and satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 115–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-115-129.
4. Bruchkovskaya S. I., Litvinovich G. S., Malyshev V. B., Measurement results of FSR and LMS spectroradiometers of the APC complex "Calibrovka", *Prikladnye problemy optiki*, *radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya* (Applied problems of optics, radiophysics and condensed matter physics), Proc. Intern. Scientific and Practical Conf., Minsk: NIIPFP, 2017, pp. 37–40 (in Russian).
5. Gordeev E. I., Girina O. A., Loupian E. A., Kashnitsky A. V., Uvarov I. A., Efremov V. Yu., Melnikov D. V., Manevich A. G., Sorokin A. A., Verkhoturov A. L., Romanova I. M., Kramareva L. S., Korolev S. P., Study of Kamchatka volcanic eruptions products using hyperspectral satellite data in the VolSatView information system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 113–128 (in Russian).
6. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Creation and use of databases of spectral images for solving problems of thematic processing of hyperspectral data of remote sensing of the Earth, *Informatsiya i kosmos*, 2015, No. 1, pp. 24–31 (in Russian).
7. Malyshev V. B., Fomin B. N., Decentralized database of spectral characteristics and parameters of the Earth's surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 53–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-53-65.
8. Malyshev V. B., Belyaev Yu. V., Bruchkovskaya S. I., Spectral studies of landscapes of the Khodutka volcanic massif, Southern Kamchatka, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 103–115 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-103-115.
9. Neshataeva V. Yu., Vegetation of the South Kamchatka reserve, In: *Flora i rastitel'nost' Yuzhnoi Kamchatki: na primere Yuzhno-Kamchatskogo gosudarstvennogo zakaznika: Trudy* (Flora and vegetation of Southern Kamchatka: on the example of the South Kamchatka State Reserve. Proc.), V. Yu. Neshataeva (ed.), Petropavlovsk-Kamchatsky, 2002, Issue 3, pp. 137–232 (in Russian).
10. Neshataeva V. Yu., *Rastitel'nost' poluostrova Kamchatka* (Vegetation of the Kamchatka peninsula), Moscow: KMK, 2009, 537 p. (in Russian).
11. Prozina M. N., *Botanicheskaya mikrotekhnika* (Botanical microtechnics), Moscow: Higher School, 1960, 206 p. (in Russian).

12. Rabotnov T. A., *Fitotsenologiya: uchebnoe posobie dlya biologicheskikh fakul'tetov vuzov* (Phytocenology: textbook for biological faculties of higher education institutions), Moscow: Izd. MGU, 1978, 384 p. (in Russian).
13. Rybin A. V., Bogomolov L. M., Kopanina A. V., Degterev A. V., Chibisova M. V., Zharkov R. V., Kozlov D. N., Vlasova I. I., Koroteev I. G., Klimantsov I. M., Romanyuk F. A., Lebedeva E. V., Belyaev Yu. V., Pasenyuk A. A., Korolev A. N., Korovin G. V., Pavlov S. V., Kirillov I. A., International expedition "Kamchatka-2016", *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2017, No. 1, pp. 141–148 (in Russian).