

## Спектральные исследования ландшафтов Ходуткинского вулканического массива, Южная Камчатка

В. Б. Малышев<sup>1</sup>, Ю. В. Беляев<sup>2</sup>, С. И. Бручковская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия  
E-mails: vmalyshhev@list.ru, bn-fomin@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, 220045, Республика Беларусь  
E-mail: belyv@tut.by*

В вулканически активных зонах на Ходуткинском вулканическом массиве, вулканы Приёмьши и Ходутка (южная часть п-ова Камчатка), проведены спектральные наземные измерения в гиперспектральном пространстве признаков (спектральное разрешение 2 нм, диапазон 256–920 нм). Широкая вариабельность ландшафтов и типов подстилающей поверхности в геодинамически активном районе позволили составить представительный массив данных, характеризующих их предметно-специфические признаки и спектральные характеристики основных элементов поверхности природных ландшафтов. Спектральные измерения проведены фотоспектрорадиометром с одновременными комплексными геологическими, геоэкологическими полевыми исследованиями, которые включали описание и отбор растительных и геологических образцов. Работы позволили создать основу обучающей выборки спектральных характеристик поверхности природных ландшафтов 10 типов. Предварительный анализ выборки показал, что данные типы поверхности могут быть статистически достаточно надёжно идентифицированы по характерным формам кривых спектральной яркости и соответствующим образом использованы для объектно-ландшафтного дешифрирования космических гиперспектральных данных вулканически активных зон. Исходные полевые данные загружены в базу спектральных эталонов и доступны по адресу: <http://spectral.igras.ru>.

**Ключевые слова:** гиперспектральная информация, спектральные характеристики, фотоспектрорадиометр, природные ландшафты, вулканический массив, геологические и геоэкологические исследования.

Одобрена к печати: 07.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-103-115

### Введение

Вулканические массивы Южной Камчатки представляют собой пример труднодоступных и сложных территорий для традиционных методов изучения. Проведение полноценного мониторинга состояния таких территорий наиболее эффективно с использованием дистанционных методов зондирования из космоса (Гордеев и др., 2015). С целью решения этой задачи «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 необходимы обучающие выборки, полученные в наземных условиях в гиперспектральном пространстве признаков природных объектов (элементов ландшафта) с их комплексной характеристикой (Малышев, Козин, 2015; Малышев, Фомин, 2019).

Основная цель исследований — измерения спектральных характеристик основных элементов природных ландшафтов Ходуткинского вулканического массива с высоким спектральным разрешением с одновременным комплексным описанием площадок измерений на тестовых участках, создание и анализ обучающей выборки на основе спектральных данных в гиперспектральном пространстве признаков.

Полевые работы проведены в июле 2016 г. комплексной экспедицией Института географии РАН (ИГ РАН), Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (ИМГиГ ДВО РАН) и Научно-исследовательского института прикладных физических проблем

(НИИПФП) им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (БГУ) в рамках проекта составной части научно-исследовательской работы «Мониторинг-СГ-1.3.1.2» ИГ РАН. В ходе полевых работ были выполнены спектральные измерения пробных площадок на тестовых участках с высоким спектральным разрешением с одновременным описанием ландшафтов, их элементов и геокомпонентов, растительных сообществ для получения геолого-геофизических, геоморфологических, геоэкологических характеристик в пределах обследованных вулканических образований и сопредельных с ними территорий.

## Методы и объекты исследований

Измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) элементов ландшафтов Ходуткинского вулканического массива (вулканы Приёмьш и Ходутка) проводились полевым однолучевым фотоспектрорадиометром (ФСР), разработанным в отделе аэрокосмических исследований НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ (Минск, Республика Беларусь).

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) фотоизображение спектрометрируемой поверхности. Перед приёмной щелью спектрорадиометра установлен проекционный объектив МС Гелиос 44-3М с фокусным расстоянием, обеспечивающим углы мгновенного поля зрения щели спектрорадиометра в  $1^\circ$  по короткой стороне и  $7^\circ$  по длинной. Рабочий спектральный диапазон использованной модели составил 256–920 нм при спектральном разрешении 2 нм (Беляев и др., 2016; Бручковская и др., 2017). Спектральная система позволяет синхронно получать спектральную характеристику и цветное фотоизображение площадки измерения с регистрацией её географических координат GPS-приёмником (Global Positioning System, система глобального позиционирования).

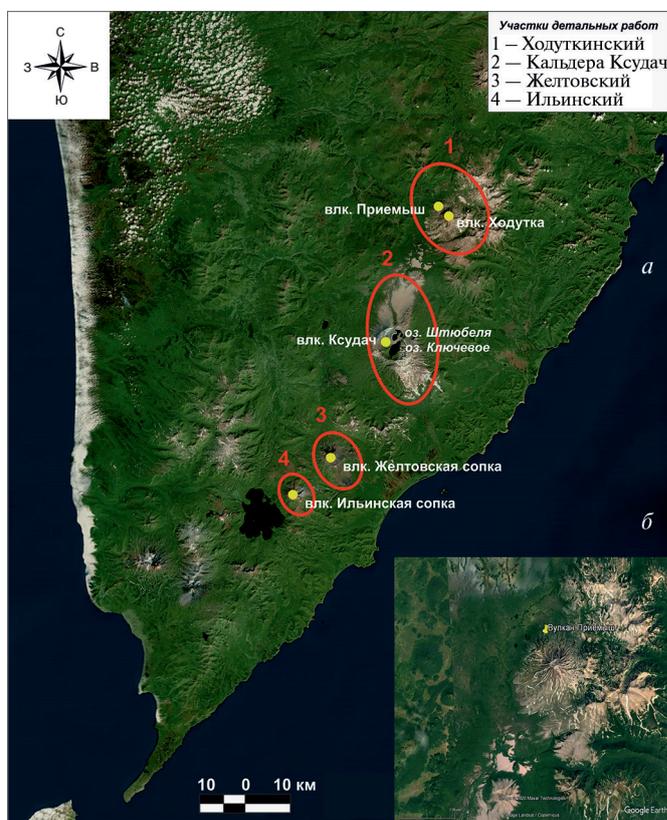


Рис. 1. Районы проведения комплексных исследований (а); влк. Приёмьш (б)

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. 104) показаны районы детальных комплексных работ, проведённых в 2016 г. на юге п-ова Камчатка. В настоящей статье рассматриваются результаты исследований, выполненных на Ходуткинском вулканическом массиве (вулканы Ходутка и Приёмьш, см. *рис. 1а* и *б*).

В геолого-структурном отношении Ходуткинский вулканический массив располагается в восточной части зоны активного вулканизма Южной Камчатки. Вокруг массива простирается вулканическое нагорье, состоящее из остатков сильно разрушенных щитообразных вулканов и лавовых плато. К западным подножиям массива примыкает зона молодого (до современного) ареального вулканизма — это базальтовые шлаковые конусы, лавовые потоки и небольшие щитовые вулканы. Ходуткинский массив состоит из двух слившихся крупных стратовулканов: Приёмьша и Ходутки (Кирсанова, Мелекесцев, 1984). Вулкан Приёмьш сложен породами андезибазальтового и андезитового состава, влк. Ходутка — более кислыми породами: андезитами, дацитами. Оба вулкана образованы преимущественно из пирокластического (пеплового, шлакового) материала: туфов, агглютинатов, тефры. Эффузивные породы (лавы) играют подчинённую роль. На склонах этих вулканов хорошо видны следы последних побочных извержений: экструзивные купола, лавовые конусы, воронки взрыва (Действующие..., 1991; Рыбин и др., 2017). Вулкан Приёмьш более древний — 10–20 тыс. лет; влк. Ходутка (*рис. 2*) сформировался в начале голоцена — менее 10 тыс. лет назад.



*Рис. 2.* Ходуткинский вулканический массив

Натурные измерения спектральных характеристик с комплексным описанием параметров объектов проводились по маршруту, проходящему по мозаичному ландшафту с характерным набором простых элементов и геокомплексов. Начало измерений — северный склон влк. Приёмьш, образованный верхней частью пирокластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией, представлен грубым пеплом и липилли среднего состава. В середине — древний лавовый поток с ольховником кустарниково-разнотравным. Встречаются угловатые глыбы андезита с пятнами накипных петрофильных лишайников. От высоты 600 м попадают геокомплексы с пятнами ивняковой горной тундры с доминирующими видами: *Salix arctica*, *Rhododendron camtschaticum*, *Hedysarum hedysaroides*. В геокомплексе также встречаются крупные глыбы агломератов андезидацитового состава. На перевале между вулканами Приёмьш и Ходутка, в нижней части, склон покрыт кедровостлабниковыми сообществами (*Pinus pumila*) в сочетании с кустарничковыми горными тундрами

в различных вариантах. В центре — вскрытый эрозией пирокластический чехол, в верхней части — лавовые потоки влк. Ходутка с куртинами кедрового стланика (*Pinus pumila*). На перевале часто встречаются крупные глыбы агглютината андезидацитового состава с пятнами накипных и кустистых лишайников и мхов (*Cassiope lycopodioides*, *Hedysarum hedysaroides*). Седловина в восточной части разрушенного кратера — тефра андезитового состава, представленная пористыми вулканическими бомбами, липилли кирпично-красного цвета, покрывает коренные выходы туфов, реже — угловатые обломки светло-серых дацитов. Этот геоконплекс также включает глыбы спёкшихся туфов андезидацитового состава с пятнами накипных петрофильных лишайников. Измерения были продолжены на водоразделе рек Западная Ходутка — Тёплая, высота 196 м н. у. м. (над уровнем моря). Эрозионная площадка — уплотнённая тефра влк. Ксудач, представленная грубым пеплом и липилли с участками мохово-лишайниковых сообществ, а также накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.). Кроме того, встречались участки шикшевых сообществ (*Empetrum nigrum*) с куртинами подроста берёзы каменной (*Betula ermanii*).

С учётом комплекса геолого-геофизических, геоморфологических и геоботанических факторов в районе работ нами выделено 10 типов объектно-ландшафтных элементов, доминирующих в составе площадей, слагающих дневную поверхность Ходуткинского вулканического массива:

- 1) пирокластический чехол влк. Приёмыш на северном склоне. Верхняя часть пирокластического чехла, вскрытого и частично переотложенного ветровой эрозией. Поверхность формирует грубый пепел и лапилли среднего состава;
- 2) спёкшиеся туфы, представленные участками выходов спёкшихся коренных туфов, покрытых тефрой андезитового состава, состоящей из пористых вулканических бомб и лапилли кирпично-красного цвета;
- 3) обнажения глыбовых агломератов андезидацитового состава на склоне вулкана;
- 4) обнажения угловатых глыб андезита с пятнами накипных петрофильных лишайников;
- 5) накипные лишайники, представленные наземным мохово-лишайниковым покровом с доминированием накипных лишайников;
- 6) кустистые лишайники, представленные наземным мохово-лишайниковым покровом с доминированием кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.);
- 7) шикшевые сообщества (*Empetrum nigrum*) с участием *Trientalis europaea* в фазе начала цветения;
- 8) ивняковая горная тундра, представленная участками горной тундры с доминированием *Salix arctica*, *Rhododendron camtschaticum*, *Hedysarum hedysaroides* в фазе плодоношения ивы, цветения рододендрона и астрагала;
- 9) заросли кедрового стланика, представленные фитоценозами кедрового стланика (*Pinus pumila*) травяно-кустарничкового с участием рододендрона (*Rhododendron aureum*) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea*) в фазе начала плодоношения;
- 10) куртины берёзы каменной (*Betula ermanii*), представленные разновозрастным подростом.

Для каждого из выделенных типов поверхности выполнена спектральная съёмка на нескольких пространственно разнесённых площадках, и таким образом сформирован анализируемый массив спектральных эталонов.

## Результаты и обсуждение

Обобщённый обзор полученных результатов спектральных измерений представлен на рис. 3–12 (см. с. 107–110). Подробные описания и спектральные характеристики всех отснятых площадок загружены в базу спектральных эталонов (Малышев, Фомин, 2019) Института географии РАН, доступной по адресу: <http://spectral.igras.ru>.

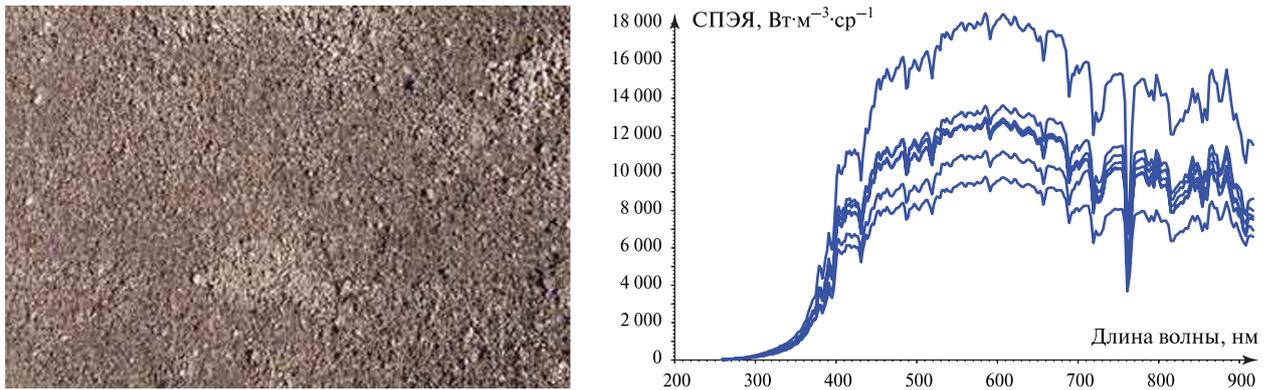


Рис. 3. Тип 1: снимок поверхности пирокластического чехла на северном склоне влк. Приёмьш, 52,09° с. ш., 157,69° в. д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 7$  (справа)

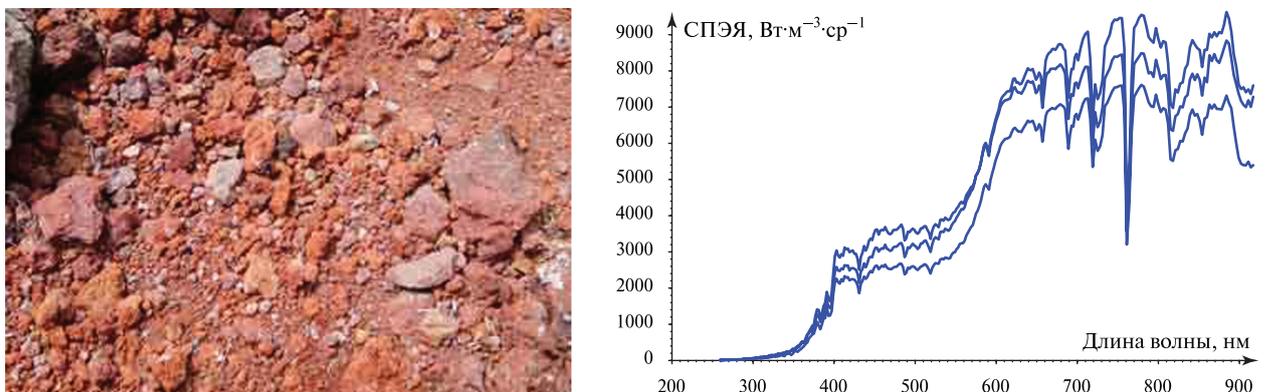


Рис. 4. Тип 2: снимок коренных выходов спёкшихся туфов на седловине влк. Приёмьш в восточной части разрушенного кратера, 52,09° с. ш., 157,69° в. д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 3$  (справа)

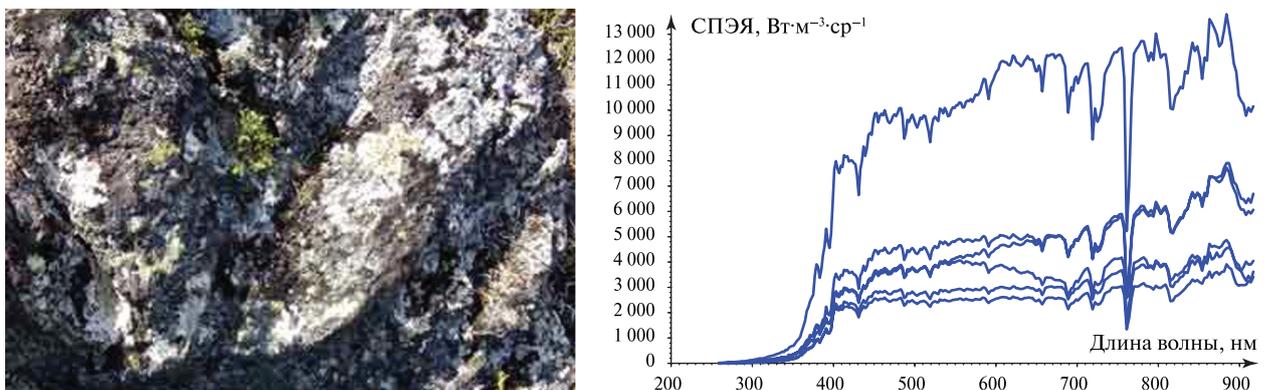


Рис. 5. Тип 3: снимок обнажения глыбовых агломератов на северном склоне влк. Приёмьш в долине р. Правая Ходутка (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 6$  (справа)

Поскольку при спектральной съёмке параллельные замеры спектральной яркости контрольной панели не проводились, то наши данные не могут быть нормированы относительно освещённости объектов в момент съёмки. Графики на рис. 3–12 построены в абсолютных значениях СПЭЯ (спектральная плотность энергетической яркости,  $Вт \cdot м^{-3} \cdot ср^{-1}$ ) и демонстрируют амплитудный разброс спектральных кривых в пределах однотипных съёмочных площадок, практически целиком, связанный не с истинными различиями площадок по удельной яркости, а с разной их освещённостью в моменты съёмки.

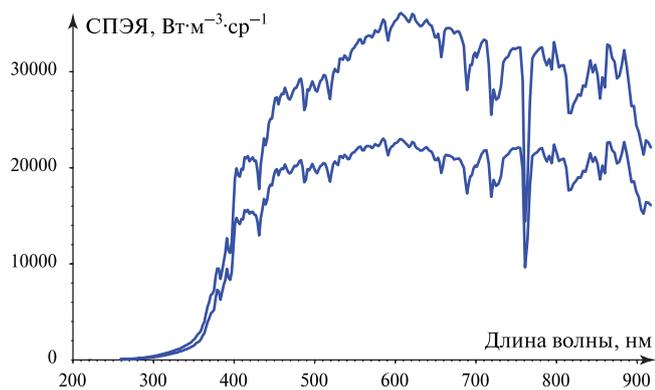


Рис. 6. Тип 4: снимок обнажения угловатых глыб андезитов на северном склоне влк. Приёмный от высоты 600 м до вершины, 52,1° с. ш., 157,69° в. д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 2$  (справа)

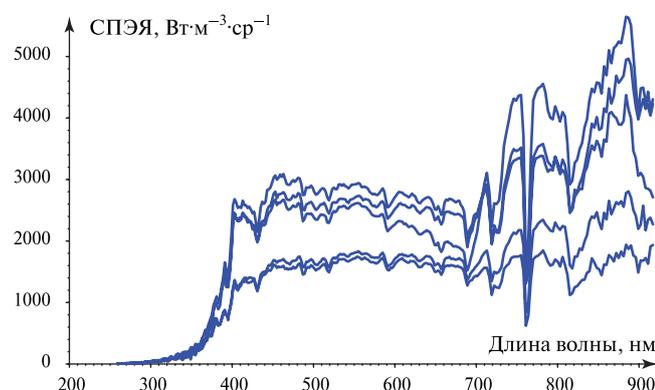


Рис. 7. Тип 5: снимок накипных лишайников на водоразделе рек Западная Ходутка–Тёплая, высота 196 м н. у. м., 51,95° с.ш., 157,55° в. д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 6$  (справа)

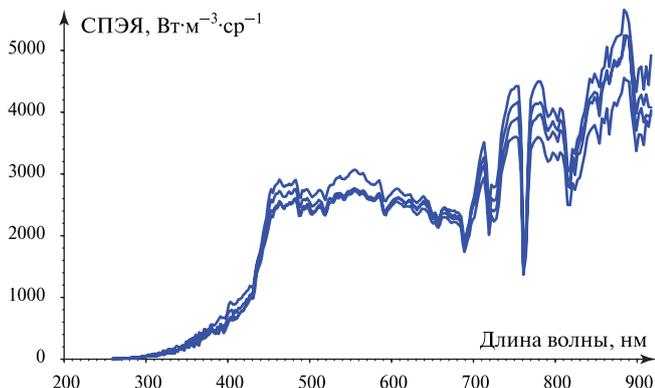


Рис. 8. Тип 6: снимок кустистых лишайников на водоразделе рек Западная Ходутка–Тёплая, 51,95° с. ш., 157,55° в. д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 4$  (справа)

Удельная яркость объектов, нормированная по освещённости, имеет существенное значение при диагностике генетически разнородных поверхностей. Например, глубоководья всегда темнее растительного покрова и открытых грунтов, песка определённого типа или тем более снега. Однако в ситуации, когда ландшафтная мозаика представлена по большей части обнажениями разноцветных вулканических пород и разными типами растительного покрова, основным диагностическим признаком выступает не удельная яркость, а форма спектральной кривой (распределение значений СПЭЯ по длине волны). В принципе, форма спектральной

ной кривой может служить единственным диагностическим признаком для распознавания различных типов поверхности при соответствующем спектральном разрешении, диапазоне и коррекции инструментальных искажений.

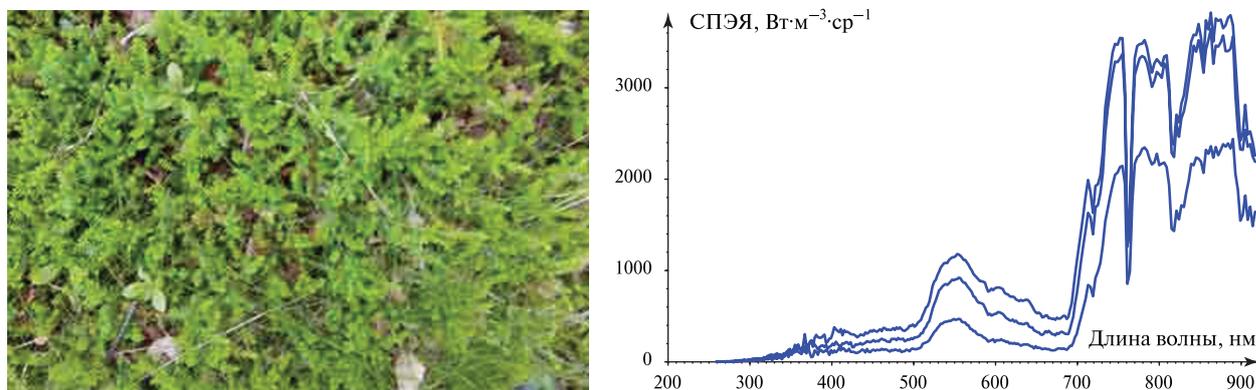


Рис. 9. Тип 7: снимок шикшевого сообщества на водоразделе рек Западная Ходутка – Тёплая, высота 196 м н. у. м., 51,95° с.ш., 157,55° в.д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 3$  (справа)

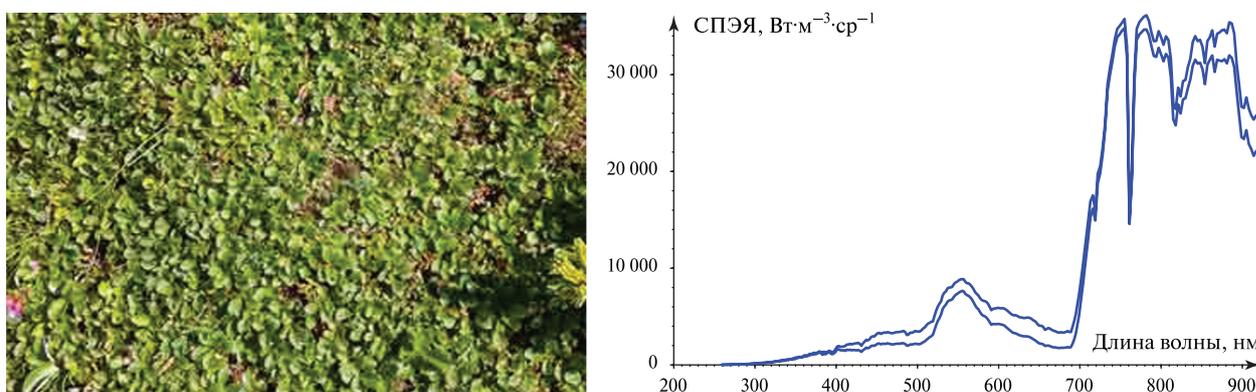


Рис. 10. Тип 8: снимок ивковой горной тундры на северном склоне влк. Приёмьш, 52,1° с.ш., 157,69° в.д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 2$  (справа)

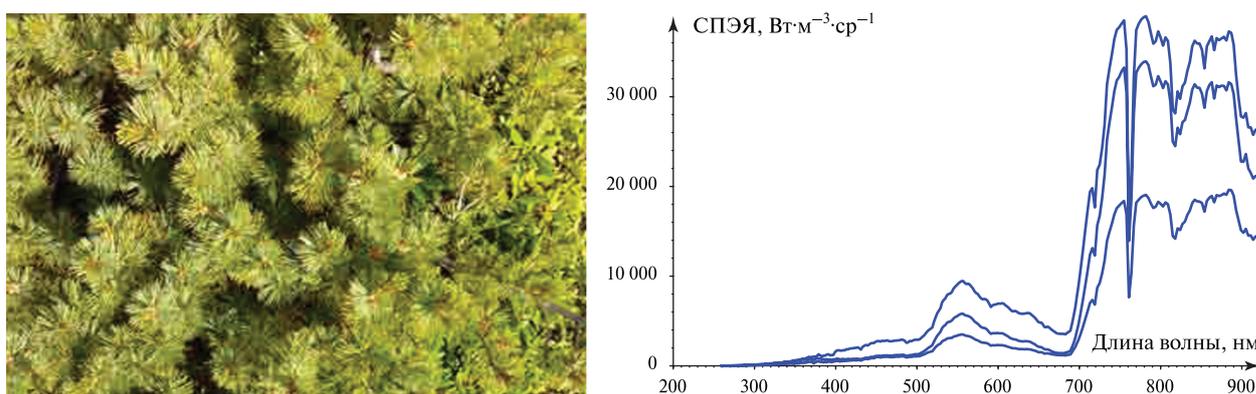


Рис. 11. Тип 9: снимок зарослей кедровостланика на северном склоне влк. Приёмьш, 52,1° с.ш., 157,69° в.д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 3$  (справа)

На рис. 13 (см. с. 110) представлены спектральные кривые, усреднённые внутри каждого из выделенных типов поверхности. При решении задачи объектно-ландшафтного дешифрирования дистанционных спектральных данных эти обобщённые спектральные образы следует рассматривать как центры распознаваемых классов.

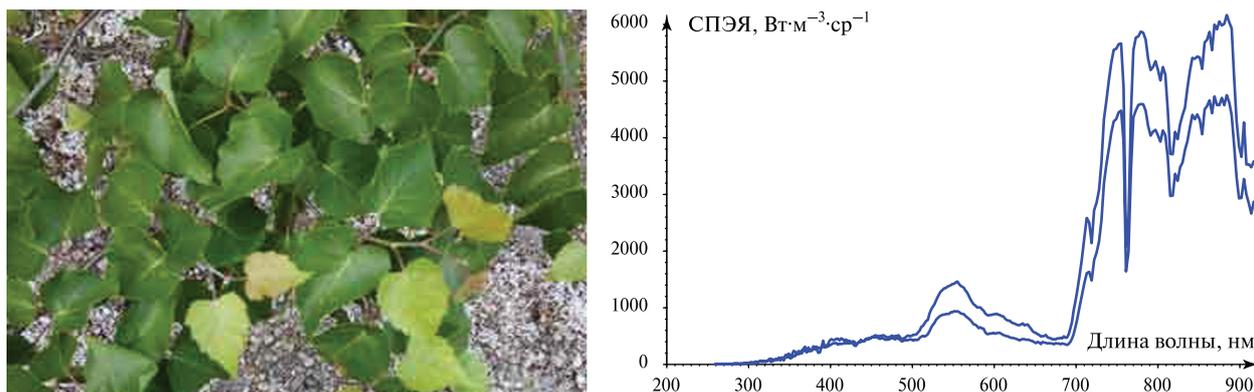


Рис. 12. Тип 10: снимок зарослей каменной берёзы на северном склоне влк. Приёмьш, 51,95° с. ш., 157,55° в. д. (слева); спектральные кривые тестовых площадок,  $n = 2$  (справа)

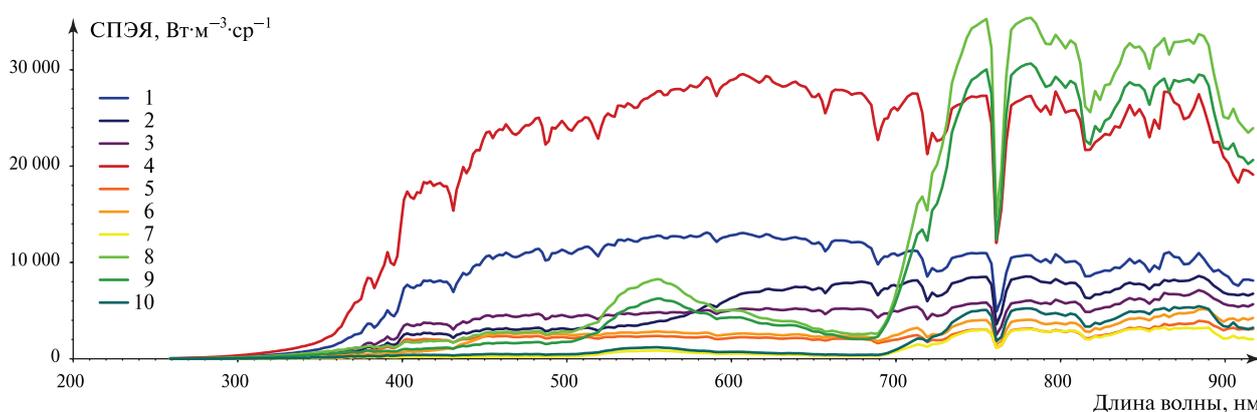


Рис. 13. Спектральные кривые выделенных типов поверхностей (внутригрупповые средние), усреднённые по абсолютным значениям СПЭЯ (номера кривых соответствуют вышеописанным типам поверхностей)

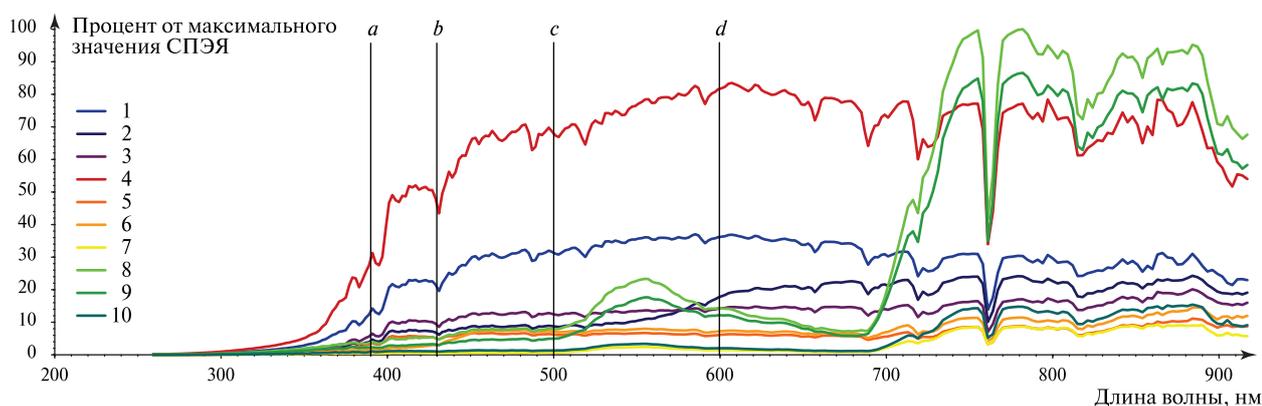


Рис. 14. Усреднённые спектральные кривые выделенных типов поверхностей, масштабированные относительно максимальных значений СПЭЯ (номера кривых соответствуют вышеописанным типам поверхностей):  $a-b$  и  $c-d$  — диагностические диапазоны

Такой подход к дешифрированию спектральных данных можно назвать принудительной классификацией. Научно-практическое обоснование этот подход находит в понятии «объекты интереса». В нашем случае объектами интереса выступают выделенные типы поверхности. Конечно, на основе собранных геолого-морфологических и геоботанических данных мы выделили не все возможные в пределах обследованной территории типы поверхности, но эти, с нашей точки зрения — наиболее распространённые. Кроме того, наземные спектральные

измерения с высоким спектральным разрешением и комплексными характеристиками этих объектов были выполнены впервые и поэтому представляют, на наш взгляд, значительный научный и практический интерес.

Различия в форме спектральных кривых более заметны в относительном масштабе рассмотрения (рис. 14, см. с. 110). В качестве меры сходства формы спектральных кривых, не зависящей от амплитудного размаха, наиболее целесообразно использовать коэффициент линейной корреляции. Однако линейная корреляция между кривыми хотя и не зависит от амплитудного размаха, но при этом сильно зависит от частотного диапазона. Поэтому вычисление коэффициентов линейной корреляции по всему диапазону зарегистрированных значений СПЭЯ (256–920 нм) с целью оценки сходства формы спектральных кривых не имеет смысла. Действительно, увеличение спектрального разрешения съёмочной аппаратуры предназначено вовсе не для того, чтобы повысить точность вычисляемых коэффициентов линейной корреляции, а для того, чтобы обнаружить некоррелирующие участки хода спектральных кривых разных типов поверхности и использовать эти участки в качестве их спектральных диагностических признаков. В результате анализа наших данных мы обнаружили два таких участка ( $a-b$  и  $c-d$  на рис. 14) и использовали их в качестве диагностических диапазонов для вычисления корреляционного сходства формы спектральных кривых.

Таблица 1. Матрица средних коэффициентов линейной корреляции групповых средних спектральных кривых с исходными вариантами спектральных кривых обучающей выборки в диагностическом диапазоне 500–600 нм

№ типа	2	1	3	4	5	6	7	8	9	10
2	<b>0,999</b> <1 <1	0,698	0,814	0,847	–0,336	–0,053	0,064	0,133	0,312	–0,033
1	0,693	<b>0,970</b> <0,996 <1	<b>0,963</b>	<b>0,962</b>	0,429	0,668	0,692	0,745	0,835	0,631
3	0,625	<b>0,911</b>	<b>0,514</b> <0,909 <0,990	<b>0,881</b>	0,425	0,618	0,566	0,625	0,705	0,516
4	0,829	<b>0,967</b>	<b>0,982</b>	<b>0,985</b> <0,995 <0,999	0,226	0,499	0,525	0,597	0,722	0,45
5	–0,279	0,447	0,294	0,235	<b>0,881</b> <0,962 <0,996	<b>0,917</b>	0,739	0,729	0,64	0,776
6	–0,051	0,653	0,494	0,469	<b>0,923</b>	<b>0,935</b> <0,980 <0,996	0,863	0,876	0,826	0,878
7	0,033	0,668	0,466	0,489	0,761	0,881	<b>0,969</b> <0,992 <0,999	<b>0,98</b>	<b>0,944</b>	<b>0,989</b>
8	0,135	0,747	0,563	0,591	0,741	0,896	<b>0,989</b>	<b>0,999</b> <1 <1	<b>0,982</b>	<b>0,981</b>
9	0,292	0,826	0,665	0,703	0,653	0,852	<b>0,964</b>	<b>0,984</b>	<b>0,992</b> <0,998 <1	<b>0,940</b>
10	–0,045	0,622	0,414	0,431	0,802	0,900	<b>0,989</b>	<b>0,977</b>	<b>0,927</b>	<b>0,992</b> <0,997 <0,999

Наиболее информативным в нашем случае оказался спектральный диапазон 500–600 нм. Вырезав участки спектральных кривых внутри границ указанного диапазона, мы вычислили

коэффициенты линейной корреляции между усреднёнными и исходными кривыми всего набора анализируемых данных (табл. 1). Если выделенные типы поверхности имеют сходные спектральные характеристики внутри типа, и различные — между типами, то корреляция внутри типа должна быть высокой, а между типами — низкой. Для коэффициентов корреляции усреднённой кривой с исходными кривыми внутри типа нами определены доверительные интервалы на 0,05-уровне значимости по критерию Стьюдента, и в диагональных ячейках таблицы указаны их экстремальные значения.

Если вычисленный по диапазону 500–600 нм коэффициент линейной корреляции произвольно взятой спектральной кривой попадает внутрь доверительного интервала коэффициентов корреляции с кривыми данного типа (коэффициенты корреляции с границами доверительных интервалов  $p = 0,05$  приведены в диагональных элементах матриц табл. 1 и 2), то эту кривую следует отнести к кривым данного типа. Следуя указанному алгоритму классификации по спектральному диагностическому диапазону 500–600 нм, нам удалось объединить все типы поверхности в четыре группы, которые в табл. 1 выделены серым цветом. В одной большой группе оказались все поверхности, покрытые древесно-кустарниковой растительностью. Другую группу образовали поверхности с мохово-лишайниковыми сообществами растительного покрова. Третью группу составили все каменистые обнажения, и только кирпично-красная тефра оказалась обладателем уникального спектрального образа.

Использование дополнительного диагностического диапазона 390–430 нм позволяет разделить спектральные образы поверхностей, представленных накипными и кустистыми лишайниками (см. табл. 2).

Таблица 2. Матрица средних коэффициентов линейной корреляции групповых средних спектральных кривых накипных и кустистых лишайников (типы 5 и 6) с исходными вариантами спектральных кривых обучающей выборки в диагностическом волновом диапазоне 390–430 нм

№ типа	5	6
5	<b>0,930 &lt; 0,987 &lt; 0,999</b>	0,75
6	0,727	<b>0,948 &lt; 0,988 &lt; 0,998</b>

Применённый здесь алгоритм принудительной классификации спектральных кривых под названием «Корреляционно-экстремальный алгоритм распознавания наблюдаемых объектов по их спектральным образам» подробно описан в работе (Козинов и др., 2013).

## Выводы и заключение

Таким образом, используя в качестве обучающей выборки обработанные нами спектральные данные, можно применить их на практике для дешифрирования гиперспектральных (спектральное разрешение 2 нм в диапазоне 256–920 нм) космических снимков районов Южной Камчатки с целью надёжного распознавания объектов: поверхностей выветренных пирокластических чехлов вулканов, крупноглыбовых агломератов различного состава, мохово-лишайникового покрова и сообществ древесно-кустарниковой растительности (заросли шикши, карликовой ивы, кедрового стланика, берёзы каменной). Анализ полученных данных показал диагностические возможности спектральных измерений геокомпонентов ландшафтов в вулканически активных зонах в гиперспектральном пространстве признаков для дистанционного зондирования земной поверхности гиперспектральными системами.

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

Авторы благодарят специалистов Института морской геологии и геофизики ДВО РАН за проведение комплексных геолого-геофизических, геоморфологических, геоэкологических

описаний спектрометрируемых площадок в пределах обследованных вулканических образований и сопредельных с ними территорий.

## 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 Международной научно-практ. конф.* Минск. 2016. Минск: НИИПФП, 2016. С. 34–38.
3. *Бручковская С. И., Литвинович С. Г., Малышев В. Б.* Результаты измерений спектрорадиометров ФСР и ДМС комплекса АПК «Калибровка» // *Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Международной научно-практ. конф.* Минск. 2017. Минск: НИИПФП, 2017. С. 37–40.
4. *Гордеев Е. И., Гирина О. А., Луян 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.
5. Действующие вулканы Камчатки. В 2 т. Т. 2. М.: Наука, 1991. 415 с.
6. *Кирсанова Т. П., Мелекесцев И. В.* О происхождении и возрасте Ходуткинских терм // *Вулканология и сейсмология*. 1984. № 5. С. 49–59.
7. *Козинев И. А., Почивалов С. Г., Топчий П. Н.* Метод корреляционного распознавания наблюдаемых объектов по многоспектральным данным // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. 2013. № 6. С. 38–41.
8. *Мальцев Г. Н., Козинев 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.
9. *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.
10. *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.
11. *Нешатаева В. Ю.* Растительность полуострова Камчатка. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2009. 537 с.
12. *Прозина М. Н.* Ботаническая микротехника. М.: Высшая шк., 1960. 206 с.
13. *Работнов Т. А.* Фитоценология: учеб. пособие для биологических фак. вузов. М.: Изд-во МГУ, 1978. 38 с.
14. *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*. № 1. 2017. С. 141–148.
15. *Krestov P. V., Omelko A. M., Nakamura Y.* Vegetation and natural habitats of Kamchatka // *Berichte der Reinhold-Tuxen-Gesellschaft*. 2008. V. 20. P. 195–218.

## Spectral studies of the landscapes of the Khodutka volcanic massif, Southern Kamchatka

V. B. Malyshev<sup>1</sup>, Yu. V. Belyaev<sup>2</sup>, S. I. Bruchkovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*  
*E-mails: vmalyshev@list.ru, bn-fomin@yandex.ru*

<sup>2</sup> *A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk 220045, Republic of Belarus*  
*E-mail: belyv@tut.by*

Spectral terrestrial measurements in the hyperspectral space of the signs (spectral resolution 2 nm in the range of 256–920 nm) were carried out in volcanically active zones on the Khodutka volcanic massif, volcanoes Priemysk and Khodutka (Southern part of the Kamchatka Peninsula). The wide variety of landscapes and types of underlying surfaces in dynamically active areas allowed creating a representative array of data, characterizing their subject-specific features and spectral characteristics of the main elements on the surface of natural landscapes. Spectral measurements were carried out by a photo spectral radiometer with simultaneous complex geological and ecological studies, including the description and selection of plant and geological samples. The work created the basis of a training sample of spectral characteristics of the surfaces for 10 natural landscape types. Preliminary analysis of the sample showed that these types of surfaces could be statistically reliably identified by the shapes of spectral brightness curves and appropriately used for object-landscape description of hyperspectral data space in volcanically active zones. The original field data are uploaded to the Spectral Standards Database available at: <http://spectral.igras.ru>.

**Keywords:** hyperspectral information, spectral characteristics, photo spectral radiometer, natural landscapes, volcanic massif, geological and geocological research

Accepted: 07.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-103-115

### References

1. Arkhipov S. A., Issledovanie trebovaniy k perspektivnoi optiko-elektronnoi apparature dlya malorazmernykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (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.
2. Belyaev Yu. V., Bruchkovskaya S. I., Litvinovich S. G., Krot Yu. V., Martinov A. O., Pasenyuk A. A., Malyshev V. B., Rezul'taty izmereniy spektral'nykh kharakteristik spektroradiometrom FSR na poluostrove Kamchatka (The results of measurements of the spectral characteristics by the FSR spectroradiometer on the Kamchatka Peninsula), *Prikladnye problemy optiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya* (Applied Problems of Optics, Radiophysics and Physics of Condensed Matter), Proc. Intern. Scientific and Practical Conf., Minsk, 2016, Minsk: NIIPFP, 2016, pp. 34–38.
3. Bruchkovskaya S. I., Litvinovich G. S., Malyshev V. B., Rezul'taty izmereniy spektroradiometrov FSR i DMS kompleksa APK "Kalibrovka" (Results of measurements of the FSR and DMS spectroradiometers of the Calibration hardware and software complex), *Prikladnye problemy optiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya* (Applied Problems of Optics, Radiophysics and Physics of Condensed Matter), Proc. Intern. Scientific and Practical Conf., Minsk, 2017, Minsk: NIIPFP, 2017, pp. 37–39.
4. 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., Verkhoturlov A. L., Romanova I. M., Kramareva L. S., Korolev S. P., Izuchenie produktov izverzheniy vulkanov Kamchatki s pomoshch'yu giperspektral'nykh sputnikovykh danykh v informatsionnoi sisteme VolSatView (Study of products of volcanic eruptions in Kamchatka using hyperspectral satellite data in the VolSatView information system), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 113–128.
5. *Deistvuyushchie vulkany Kamchatki, v 2 t., T. 2* (Active Kamchatka Volcanoes, in 2 vol., Vol. 2), Moscow: Nauka, 1991, 415 p.
6. Kirsanova T. P., Melekestsev I. V., O proiskhozhdenii i vozraste Khodutkinskikh term (On the origin and age of the Khodutka Thermae), *Vulkanologiya i seismologiya*, 1984, No. 5, pp. 49–59.

7. Kozinov I. A., Pochivalov S. G., Topchiy P. N., Metod korrelyatsionnogo raspoznavaniya nablyudaemykh ob"ektov po mnogospektral'nym dannym (Method correlation recognition of observed objects based on multispectral data), *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport*, 2013, No. 6, pp. 38–41.
8. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Sozdanie i ispol'zovanie baz dannykh spektral'nykh obrazov dlya resheniya zadach tematicheskoi obrabotki giperspektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Implementation and use of spectral footprint databases of specialized processing of Earth remote sensing hyperspectral data), *Informatsiya i Kosmos*, 2015, No. 1, pp. 24–31.
9. Malyshev V. B., Fomin B. N., Detsentralizovannaya baza dannykh spektral'nykh kharakteristik i parametrov ob"ektov zemnoi poverkhnosti (Decentralized database of spectral characteristics and parameters of Earth surface features), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 53–65, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-53-65.
10. Neshataeva V. Yu., Rastitel'nost' Yuzhno-Kamchatskogo zakaznika (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. Proceedings), V. Yu. Neshataeva (ed.), Issue 3, Petropavlovsk-Kamchatskii, 2002, pp. 137–232.
11. Neshataeva V. Yu., Rastitel'nost' poluostrova Kamchatka (Vegetation of the Kamchatka Peninsula), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2009, 537 p.
12. Prozina M. N., *Botanicheskaya mikrotehnika* (Botanical Microtechnics), Moscow: Vysshaya shkola, 1960, 206 p.
13. Rabotnov T. A., *Fitotsenologiya: uchebnoe posobie dlya biologicheskikh fakul'tetov vuzov* (Phytocenology: a textbook for the biological faculties of universities), Moscow: Izd. MGU, 1978, 384 p.
14. Rybin A. V., Bogomolov L. M., Kopanina A. V., Degterev A. V., Chibisova M. V., Sharkov R. V., Kozlov D. N., Vlasova I. I., Koroteev I. G., Klimantsov I. M., Romanyuk F. A., Lebedeva E. V., Belyaev Yu. V., Paseynyuk A. A., Korolev A. N., Korovin G. V., Pavlov S. V., Kirillov I. A., Mezhdunarodnaya ekspeditsiya "Kamchatka-2016" (International Expedition "Kamchatka-2016"), *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2017, No. 1, pp. 141–148.
15. Krestov P. V., Omelko A. M., Nakamura Y., Vegetation and natural habitats of Kamchatka, *Berichte der Reinhold-Tuxen-Gesellschaft*, 2008, Vol. 20, pp. 195–218.