

УДК 535.24

Исследования спектрально-поляризационных свойств порошкообразного шунгита после термической обработки

Белоусова Е.С.*, Лыньков Л.М.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
БГУИР, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь*

*e-mail: elena1belousova@gmail.com

**e-mail: leonid@bsuir.by

Аннотация

Исследованы спектрально-поляризационные свойства порошка шунгита после термического отжига при температуре 900 С в течении 2 часов в различных средах (окисленная, среда хлорида аммония, вакуум). Представлены зависимости коэффициента спектральной яркости и степени поляризации от длины волны в видимом и инфракрасном диапазоне для угла падения света 45 при разных углах наблюдения для шунгита, отожженного в различных средах.

Ключевые слова: дистанционное обнаружение объектов, шунгит, отжиг, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации.

Введение

Исследование спектрально-поляризационных свойств материалов проводят для определения отражательной способности объектов наблюдения, которая зависит от длины волны падающего света. Измерение и анализ физических параметров света, отражаемого исследуемыми объектами, позволяет получить дополнительные

сведения об их свойствах. Измеряемыми параметрами в этих исследованиях являются пространственные и угловые зависимости энергетических, спектральных и поляризационных характеристик объектов на поверхности Земли. Многие современные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют получать изображения при различной поляризации излучения. Применение спектрополяризационных методов для дистанционного обнаружения дает более точную классификацию наземных объектов и подстилающих поверхностей (низкорослая растительность, леса, грунты, песок) [1]. Измерение спектральной яркости и расчет степени поляризации оптического излучения, отраженного от поверхности объектов, позволяет получить дополнительные сведения о свойствах исследуемых объектов, причем значительная часть этой информации не может быть получена путем измерения только интенсивности отраженного электромагнитного излучения [2].

Для скрытия наземных объектов от обнаружения средствами дистанционного зондирования на фоне подстилающей поверхности (почвы, песок, растительность) могут использоваться маскирующие материалы с отражательными характеристиками, схожими по своим спектральным и поляризационным свойствам с естественным фоном [3]. В оптических каналах утечка информации осуществляется посредством электромагнитного поля (фотонов) в диапазоне 0,46...0,76 мкм (видимый свет) и 0,76...3 мкм (инфракрасные излучения), посредством использования различных оптических приборов, позволяющих уменьшить величину порогового контраста объекта на окружающем фоне [4].

Целью данной работы являлось исследование спектрально-поляризационных свойств шунгита после его термической обработки в различных средах (окисленной, среде хлорида аммония, вакуум). Образцы порошкообразного шунгита с размером фракции не более 20 мкм подвергнуты термическому отжигу при температуре 900 С в течении 2 часов.

Основу шунгита составляет углеродсиликатная составляющая, представленная кварцем ($\alpha\text{-SiO}_2$) с массовой долей 50,1% и различными формами углерода (графит с массовой долей 11,3%, фуллерен (C_{60}) с массовой долей 18,8%) [5]. Поглощение света шунгитом обусловлено, в первую очередь, концентрацией графитоподобного углерода в объеме образцов, что объясняется его молекулярным строением. Один из электронов его атома образует π -связь. Электроны на π -орбиталях делокализованы, т.е. они могут перемещаться по молекуле [6]. Остальные примеси в силу их незначительного содержания не существенно влияют на оптические свойства исследуемых образцов. Значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) определяется соотношением двух основных химических компонентов шунгита – углерода и оксида кремния. Чем выше содержание углерода в образце по сравнению с кварцем, тем выше степень поляризации и ниже СКЯ. При увеличении содержания углерода и уменьшении содержания кварца КСЯ снижается с 0,02... 0,05 отн. ед. для шунгита и до 0,006... 0,016 отн. ед. для активированного угля (содержание углерода составляет 98%). В основном значения КСЯ свидетельствуют о диффузном рассеивании света шунгитом и определяются соотношением углерода и оксида кремния [7].

Методика измерения спектрально-поляризационных свойств порошкообразного шунгита

Для исследования спектрально-поляризационных свойств порошкообразных шунгита после термической обработки были изготовлены образцы, представляющие собой слой порошкообразного материала шунгита (размер фракции не более 20 мкм) на плоской целлюлозной подложке. Исследуемый материал наносился плотным слоем на подложку, чтобы избежать просветов и исключить влияние подложки на измеряемые коэффициенты спектральной яркости и степень поляризации.

Для исследования свойств созданных образцов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн (450... 2300 нм) использовались гониометрическая установка и спектро радиометр ПСР-02 имеющий разрешение не хуже 2 нм с поляризационной насадкой, позволяющий регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образцов при различных положениях оси поляроида.

Спектро радиометр ПСР-02 предназначен для проведения измерения в лабораторных и полевых условиях спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), а также поляризационных характеристик отраженного растительными элементами или другими объектами излучения в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм.

Спектро радиометр состоит из спектрометрического модуля, управляющей портативной ЭВМ, комплекта специальных насадок, комплекта кабелей,

специального программного обеспечения. Спектрометрический модуль предназначен для регистрации спектров в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм и состоит из полихроматора видимого диапазона, полихроматора инфракрасного диапазона (ПИК), проекционного объектива, спектроделителя, поворотного зеркала, микро-ЭВМ [8]. Блок-схема установки приведена на рис. 1, где 1 – гониометр Г-5; 2 – спектрорадиометр ПСР-02; 3 – персональный компьютер; 4 – поляризационная насадка; 5 – исследуемый объект; 6 – диафрагма; 7 – коллиматор; 8 – система охлаждения; 9 – осветительная лампа КГМ-250; 10 – блок питания СНП-40.

В результате обработки зарегистрированных на гониометрической установке спектров отражения в диапазоне 0,45-2,3 мкм были получены зависимости СПЭЯ $L(\lambda)$ и степени линейной поляризации $P(\lambda)$ излучения при угле падения света 45° и углах наблюдения 0°, 25°, 45° и 65°.

Спектральной плотностью энергетической яркости называется предел отношения энергетической яркости, соответствующей узкому участку спектра, к ширине этого участка, $\left(\frac{Вт}{см^2 \cdot мкм \cdot ср} \right)$.

Угол падения коллимированного пучка света на исследуемый объект (γ) составлял 45°. Использовались три положения оси поляроида относительно вертикальной плоскости: 0°, 45° и 90° с точностью 0,5°. Углы наблюдения (β) были выбраны фиксированные: 0°, 25°, 45° и 65°. Углы наблюдения и падения отсчитывались от нормали к плоскости исследуемого объекта.

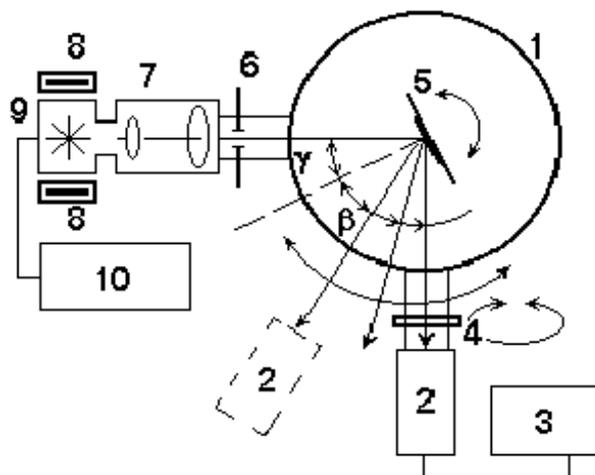


Рис. 1. Блок-схема гониометрической измерительной установки
спектрорадиометра ПСР-02

Для обработки спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых объектов были получены спектры отражения для материала с равномерной индикатрисой, в качестве которой использовался диффузный отражатель (пластина молочного стекла МС-20 толщиной 10 мм). Для анализа спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемого объекта были получены спектры отражения для эталонного образца, выполненного на основе молочного стекла (МС-20) с равномерной индикатрисой рассеяния при условиях измерений, аналогичных условиям для исследуемых образцов.

Результаты и обсуждение

КСЯ вычислялся как отношение СПЭЯ исследуемого материала к СПЭЯ материала с равномерной индикатрисой рассеяния – МС-20. Величины СПЭЯ-спектров отражения образцов L_{ob} нормировались на величину СПЭЯ-спектра, отраженного от МС-20 излучения L_{MS} для каждой длины волны, получая коэффициент спектральной яркости (КСЯ) исследуемых образцов $R_{ob}(\lambda)$:

$$R_{ob} = \frac{L_{ob}}{L_{MS}} \quad (1)$$

Учитывая спектральную чувствительность приемника измерительной установки и спектральную характеристику используемого источника света для исключения шумовых компонент в спектрах отражения, анализировались полученные значения СКЯ в диапазоне длин волн 450... 940 нм.

Измерения степени поляризации отраженного от объектов излучения в диапазоне 0,45— 2,3 мкм проводились с помощью поляризационной насадки на основе призмы Глана-Тэйлора, устанавливаемой непосредственно перед объективом спектро радиометра. Для каждого угла наблюдения фиксировались спектральные сигналы L_0 , L_{45} и L_{90} при трех положениях оси (0 , 45 , 90) поляризационной насадки [9]. Степень поляризации рассчитывалась для каждой длины волны λ следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L} \quad (2)$$

где Q , U , L - параметры Стокса, определяемые по формулам

$$Q = L_{90} - L_0 \quad (3)$$

$$L = L_0 + L_{90} \quad (4)$$

$$U = L_0 + L_{90} - 2L_{45} \quad (5)$$

Спектральная зависимость степени поляризации P отраженного от объектов излучения корректировалась вычитанием известной поляризующей способности P_{PSR} спектро радиометра ПСР-02 [10]:

$$P = P_{ob} - P_{PSR} \quad (6)$$

Поляризующая способность ПСР-02 определялась с помощью диффузного излучателя – неполной фотометрической сферы, являющейся источником деполяризованного излучения в широком спектральном диапазоне вследствие многократных переотражений внутри сферы.

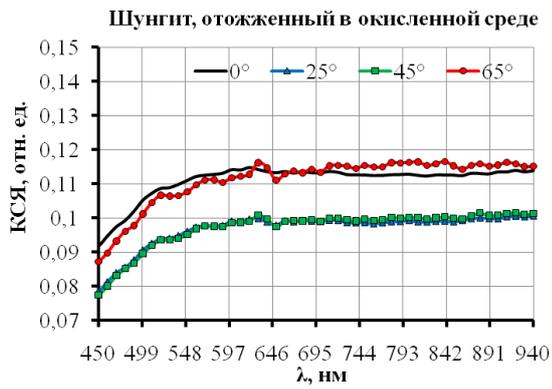
Анализ погрешностей с учетом того, что относительная ошибка калибровки спектрорадиометра не больше 4%, показал, что относительная неопределенность измерения интенсивности излучения, степени и азимута поляризации не превышает: $\Delta L/L \leq 4\%$ (без поляризационной насадки в оптической системе спектрорадиометра), $\Delta P \leq 3\%$, $\Delta \theta < 4$ (последнее для $P=20\%$, так как $\Delta \theta \sim 1/P$) [11].

На основе полученных экспериментальных и расчетных данных получены зависимости коэффициента спектральной яркости и степени поляризации от длины волны в видимом и инфракрасном диапазоне для угла падения света 45° при углах наблюдения 0° , 25° , 45° и 65° для шунгита, отожденного в различных средах (см. рис. 2, 3).

Экспериментально полученные оптические характеристики образцов показывают, что для шунгита (содержание углерода составляет 30%) получены наименьшие значения КСЯ (0,02... 0,024 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,02... 0,04 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм) (см. рис. 2г). Это можно объяснить тем, что значительная доля энергии падающего светового потока поглощается, оставшаяся часть света отражается от поверхности образца, но вследствие наличия на ней микроскопических неоднородностей частично

рассеивается. Другие образцы по сравнению с образцом из шунгита отражают большую долю падающего светового потока, что подтверждается увеличением значения КСЯ для всех углов наблюдения (см. рис. 2а, 2б, 2г). Для шунгита, отожденного в окисленной среде КСЯ максимальное и составляет 0,09... 0,11 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,1... 0,14 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм, для шунгита, отожденного в вакууме – 0,08... 0,085 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,08... 0,1 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм, для шунгита, отожденного в среде с добавлением хлорида аммония – 0,045... 0,062 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,05... 0,09 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм. У всех порошков, подверженных термическому отжигу, значение КСЯ выше, чем КСЯ шунгита или активированного угля, что говорит об увеличении в составе вещества оксидов кремния и его образующих веществ и уменьшении процентного содержания углерода.

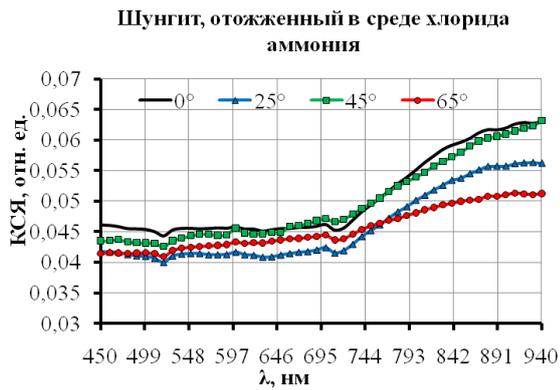
Значения спектрально-поляризационных характеристик шунгита обусловлены его структурой, которая представляет собой равномерное распределение частиц кварца в графитоподобной глобулярной углеродной матрице. Поэтому при падении светового потока на поверхности образца из шунгита он в меньшей степени поглощается и в большей отражается.



а)



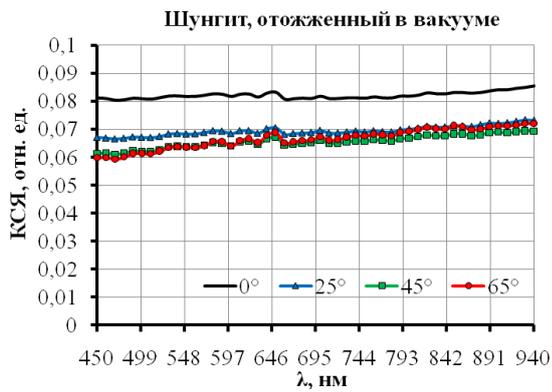
б)



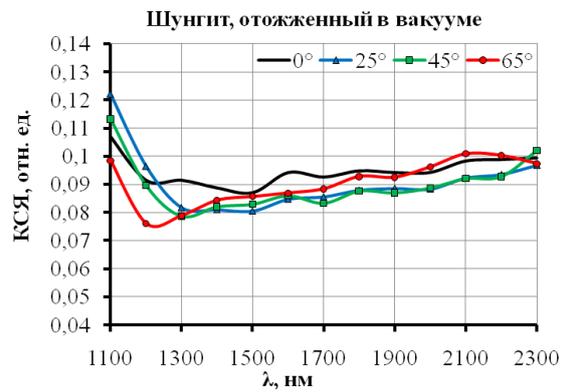
в)



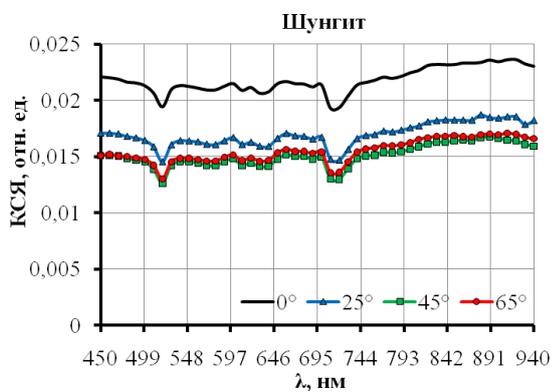
г)



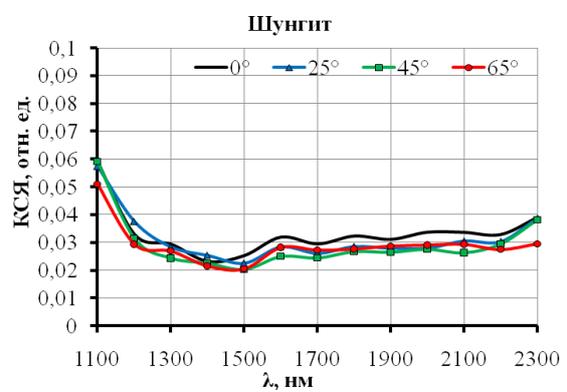
д)



е)



ж)

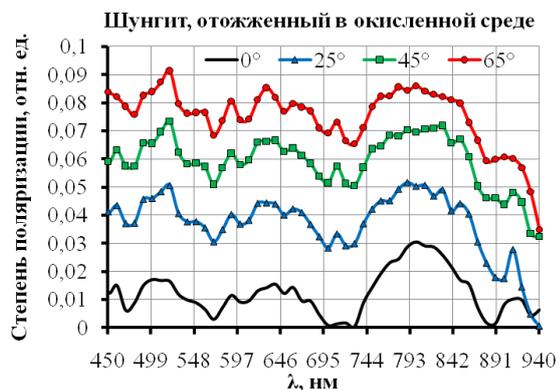


з)

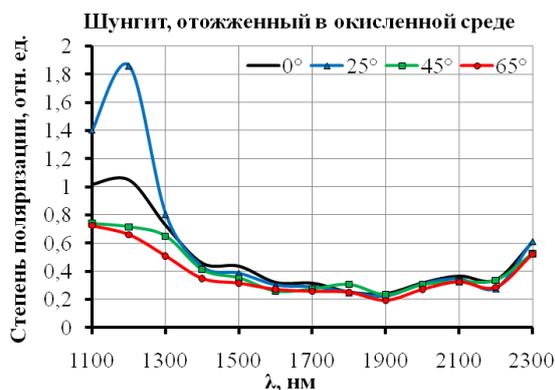
Рис. 2. Зависимость коэффициента спектральной яркости от длины волны в видимом и инфракрасном диапазоне при углах наблюдения 0 , 25 , 45 и 65

Степень поляризации указанных материалов зависит от соотношения в них углерода и кварца и возрастает с увеличением удельного веса углерода: наибольшее ее значения для шунгита – 0,45 отн. ед., активированного угля – 0,58 отн. ед. [7].

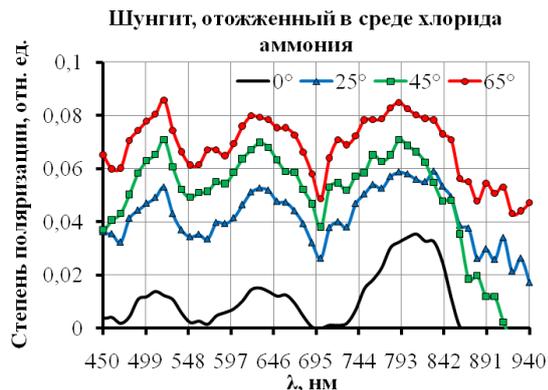
Вследствие отжига шунгита в различных условиях степень поляризации уменьшается за счет удаления при больших температурах углеродных составляющих. Так для шунгита, отожженного в окисленной среде, степень поляризации уменьшается до значения 0,08... 0,095 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,3... 0,6 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм, в среде с добавлением хлорида аммония – 0,06... 0,09 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,2... 0,6 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм, по сравнению со степенью поляризации неотожженного шунгита (0,1... 0,25 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,4... 0,6 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм), что связано с уменьшением процентного содержания углерода в отожженных образцах. Для образца шунгита, отожженного в вакууме, степень поляризации практически не изменяется и имеет значения в интервале 0,14... 0,27 отн. ед. в диапазоне длин волн 450–940 нм и 0,3... 0,4 отн. ед. в диапазоне длин волн 1300–2300 нм для угла наблюдения 0° , что свидетельствует о наличии углерода в составе отожженного порошка (см. рис. 3д).



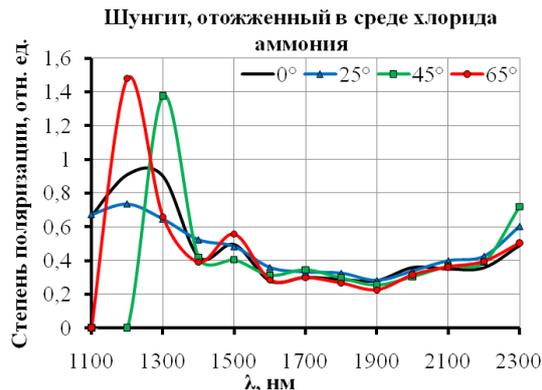
а)



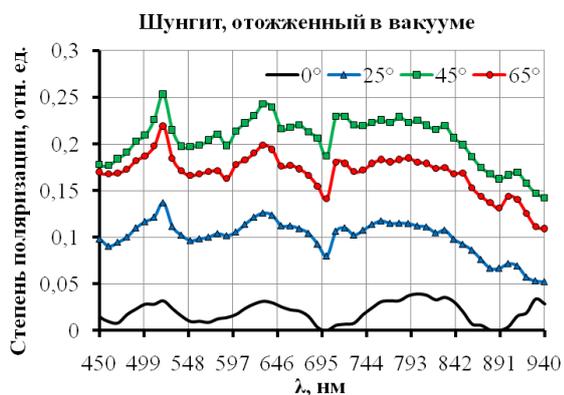
б)



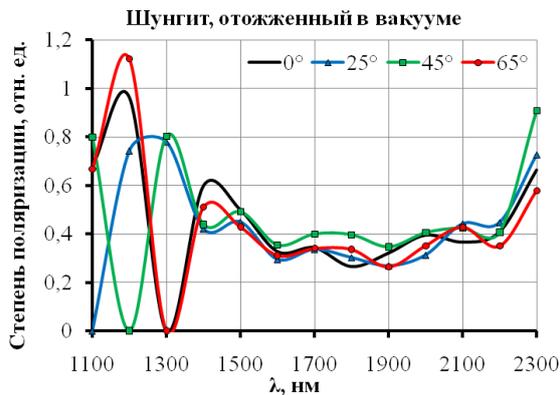
в)



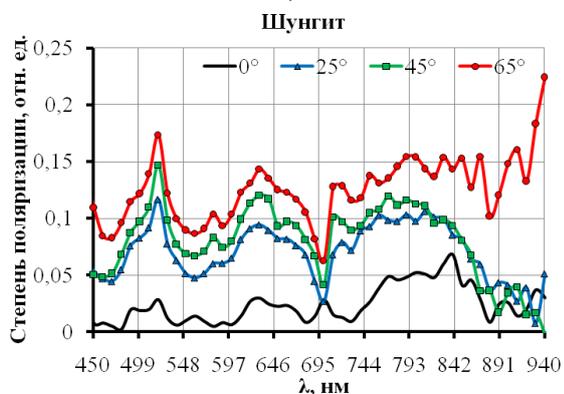
г)



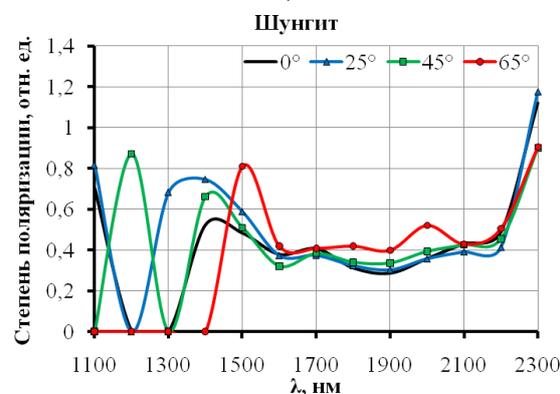
д)



е)



ж)



з)

Рис. 3. Зависимость степени поляризации от длины волны в видимом и инфракрасном диапазоне при углах наблюдения 0 , 25 , 45 и 65

Заключение

Полученные зависимости коэффициентов спектральной яркости и степени поляризации порошкообразных образцов в диапазоне длин волн 490... 790 нм являются равномерными. Установлено, что все исследуемые образцы диффузно рассеивают свет. Наибольшее значение КСЯ получено для шунгита, отожженного в окисленной среде, что говорит о наибольшем содержании оксида кремния в составе вещества. Это также подтверждается рентгенодифракционным анализом, в котором было выявлено, что в порошке шунгита, подверженного отжигу в окисленной среде, содержится 68,8% ортоклаза и 8,6% диоксида кремния [5]. Результаты, полученные при измерении степени поляризации, также подтверждают результаты рентгенодифракционного анализа. Наименьшее значение степени поляризации получено для шунгита, отожженного в окисленной среде (0,08... 0,091 отн. ед.) и среде с добавлением хлорида аммония (0,06... 0,087 отн. ед.), в которых не было обнаружено углерода. Таким образом, после отжига в данных средах происходят изменения в процентном содержании углерода и кварца в шунгите, в то время как отжиг в вакууме не влияет на химический состав вещества [12].

На основе известных значений КСЯ различных типов почв [13] можно сделать вывод, что значения КСЯ отожженных порошков шунгита коррелируют со значениями КСЯ растительности, а в частности, шунгит, отожженный в окисленной среде и в вакууме, имеет значения КСЯ совпадающие со значениями КСЯ подзолистых и суглинистых почв в диапазоне длин волн 400–700 нм, спектральные свойства шунгита, отожженного в среде с добавлением хлорида аммония,

аналогичны черноземным и супесчаным почвам. Значения КСЯ шунгита коррелируют со значениями КСЯ водоемов, черноземных и супесчаных почв, хвойных пород леса зимой в диапазоне длин волн 400–700 нм. Таким образом, в зависимости от режима отжига, шунгит можно использовать в качестве углеродсодержащих материалов, позволяющих выявить, подчеркнуть или скрыть фактуру материалов, защищающих силуэты, конструктивные особенности объектов на естественном фоне.

Библиографический список

1.Беляев Ю.В. Катковский Л.В., Курикина Т.М., Шупляк В.И. Классификация лесных участков по спектрональным изображениям, полученным с борта вертолета // Журнал прикладной спектроскопии. –2001. – № 2. – С. 258-263.

2.Вандербилт В.С., Грант Л., Дотри К.С.Т. Поляризация света, рассеянного растительностью // ТИИЭР. – 1985. – № 6. – С. 72-85.

3.Лифанов Ю.С., Саблин В.Н., Федоринов А.Н., Шапошников В.И. Направления развития современных радиолокационных средств и систем разведки наземных целей: радиолокационные системы космического базирования // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №5. – С 3-14.

4.Волохатюк В.А., Кочетков В.М., Красовский Р.Р. Вопросы оптической локации – М.: Советское радио, 1971. – 176 с.

5.Белоусова Е.С. Модификация порошкообразного шунгита для использования в качестве экранов электромагнитного излучения / Сборник

материалов 49-ой научной конференции «Телекоммуникационные системы и сети». Минск, БГУИР, 6-10 мая 2013 г. – Минск, 2013. – С. 3–4.

6. Шретер В. Химия: справочное издание. – М.: Химия, 1986. – 648 с.

7. Криштопова, Е.А., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Спектрально-поляризационные свойства углерода, шунгита и таурита // Доклады БГУИР. - 2009. - №2. - С. 3 - 8.

8. Полевой спектро радиометр ПСР-02 // Сайт отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко Белгосуниверситета. 2013. URL: <http://remsens.by/development/spectrometers/psr02> (дата обращения: 10.01.2014).

9. Доморацкий А.В., Казак А.В., Курикина Г.М., Цикман И.М. Расширение функциональных возможностей полевых спектро радиометров с использованием различных систем ввода излучений // Материалы 3-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2010». Минск, 10-12 ноября 2010 г. – Минск, 2010. – С. 140-141.

10. Беляев Б.И. Беляев Ю.В., Нестерович Э.И., Сосенко В.А., Хомицевич А.Д., Цикман И.М. Полевой спектро радиометр ПСР-02 на область 0,35-2,5 мкм // Приборы и техника эксперимента. – 2010 – №2 – С. 127-132.

11. Беляев Ю.В., Дж. Саад Омер, Цикмак И.М. Исследование оптических отражательных характеристик поверхностей различных объектов при дистанционном зондировании // Доклады БГУИР. – 2011. – № 1(55). – С. 75-79.

12. Белоусова Е.С., Махмуд М.Ш. Влияние режимов отжига на оптические свойства шунгита // Материалы XXI международной научно-практической

конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния (ФКС – XXI)». Гродно, ГрГУ им. Я. Купалы, 18 – 19 апреля 2013 г. – Гродно, 2013. – С. 60–62.

13.Спектры отражения природных объектов – база данных // GIS-Lab («ГИС Лаборатория»). 2014. URL: <http://gis-lab.info/projects/spectra/> (дата обращения: 23.01.2014).