

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ОБЛАСТЕЙ МЕСТНОСТИ С ХАРАКТЕРНЫМИ СВОЙСТВАМИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

БАЖЕНОВА А. И., МИЛИЧ В. Н.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Рассматривается задача поиска областей местности с характерными свойствами, где под характерным свойством в настоящей работе понимается наличие археологического памятника, ненаблюдаемого на поверхности Земли. Объект исследования – участок аэрокосмического снимка земной поверхности на территории расположения археологического памятника, можно отнести к мезоскопическим изображениям. Продемонстрированы возможности использования вейвлет-преобразования к задачам поиска территорий с характерными свойствами на примере поиска областей перспективных с точки зрения наличия археологических памятников по снимкам, полученным с беспилотных летательных аппаратов. Результаты применения метода к изображениям двух археологических памятников показывают высокий уровень соответствия эталонным данным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: беспилотные летательные аппараты, области изображений с характерными свойствами, вейвлет-преобразование, геофизика, археология.

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), представленные в виде изображений, полученных как с космических спутников, так и с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), могут служить полезным источником информации при решении таких задач, как поиск территорий с заданными характерными свойствами [1]. Под характерными свойствами понимаются особенности территории, которые отличают конкретную область от остального «фона». В частности, таким свойством может служить наличие заглубленных объектов, например, археологических памятников. Эти территории отличаются на изображениях дистанционного зондирования тоном и структурой, что обусловлено особенностями растительности, которая является фитоиндикатором объектов, находящихся под поверхностью земли. Таким образом, объектом исследования являются изображения поверхности Земли, которые при уровне доступного для современных съемочных систем разрешения, не могут быть отнесены к изображениям детальной съемки, т.е. микроскопическим, и также не могут быть отнесены к изображениям, характеризующим макроскопическую структуру объекта съемки, и поэтому относятся к мезоскопическим.

Поскольку наличие заглубленных археологических памятников, заполненных гумусным слоем, влияет на характеристики растительности над памятником, то задача может быть решена путем применения метода обработки изображений с БПЛА, позволяющего обнаруживать области с большой мощностью гумусного слоя по состоянию растительности на земной поверхности над памятником. Следовательно, обнаружение областей с характерными особенностями сводится к анализу состава и состояния этой растительности. Распознавание разных видов растительности по их дистанционным изображениям является задачей распознавания трудноразличимых объектов и для ее решения предлагается метод обработки снимков с использованием признаков, основанных на вейвлет-преобразовании [2] и ранее разработанных для классификации объектов растительности [3].

Таким образом, исходной точкой исследования является то, что мультиспектральные данные ДЗЗ применяются при решении задач археологии благодаря тому, что изменения в химико-биологических свойствах растительности и почвы сказывается на их отражательной способности. Съемка, проводимая в нескольких диапазонах электромагнитного спектра

(как правило, синий, зеленый, красный и инфракрасный каналы), способна улавливать и отображать эти изменения на снимках. Результат такой мультиспектральной съемки существенно превосходит по информативности съемку в одном канале – даже в инфракрасном. Существующие методы обработки изображений ДЗЗ для решения задач поиска областей с характерными свойствами обычно основаны на применении вегетационных индексов (например, [4]), учитывающих только спектральные особенности объектов на поверхности. При этом не учитываются пространственные особенности, которые также могут быть информативны для решения подобных задач. Эффективным инструментом для получения характеристик, учитывающих как спектральные, так и пространственные особенности является вейвлет-преобразование сигналов [2].

Настоящая статья посвящена изучению возможностей применения вейвлет-преобразования для обнаружения областей местности с характерными свойствами на примере задачи поиска археологических памятников по изображениям с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящем исследовании рассматривается снимок, сделанный на территорию одного из наиболее изученных археологических памятников региона: Кушманское III селище [5] в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне (рис. 1, б). Требовалось в результате обработки снимка получить изображение, на котором можно выделить область, относящуюся к рассматриваемому археологическому памятнику.

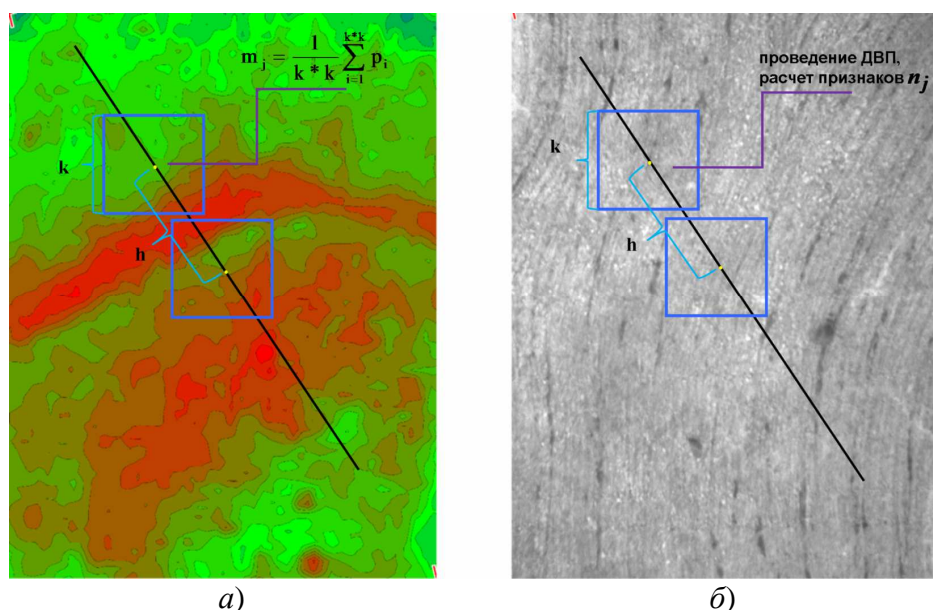


Рис. 1. а) – Процесс расчета средних значений в окне размером $k \times k$ и со сдвигом h по карте мощности гумусного слоя; б) – процесс расчёта значений признаков в окне размером $k \times k$ и со сдвигом h по снимку, полученному с БПЛА в БИК диапазоне

В качестве эталона использовалось изображение, полученное в результате геофизических исследований на той же территории (Кушманское III селище) (рис. 1, а). На этом изображении красным областям соответствуют области с высоким удельным сопротивлением, что в свою очередь указывает на мощный гумусный слой.

Таким образом, необходимо в результате цифровой обработки изображения с БПЛА (рис. 1, б) получить новое изображение, которое бы показывало высокую корреляцию с изображением, взятым за эталон (рис. 1, а).

Для решения поставленной задачи используется линия сканирования, проведенная на эталонном изображении таким образом, чтобы охватить различные области (рис. 1). Вдоль этой линии в окнах размером $k \times k$ рассчитываются средние значения m_j яркостей пикселей.

Вдоль аналогичной линии на снимке с БПЛА в окнах того же размера $k \times k$ производится расчёт признаков n_j , характеризующих особенности растительности. Признаки разработаны на основе применения вейвлет-преобразования.

Используемые признаки, описывающие растительность, основаны на использовании двумерного дискретного вейвлет-преобразования (ДВП). Согласно схеме Малла быстрого ДВП [6] изображение подвергается низкочастотной и высокочастотной фильтрации, в результате чего на 1 уровне получают 4 новых изображения, которые характеризуют сглаженное изображение и его детали (рис. 2). Для получения следующего уровня преобразования повторяют ту же процедуру с изображением аппроксимации, полученном на предыдущем этапе. Такой процесс называется кратномасштабным анализом, ценность которого состоит в том, что он позволяет на разных масштабах выявлять разные частоты. Для каждого полученного изображения ДВП были вычислены признаки, являющиеся разнообразными статистическими характеристиками [3].

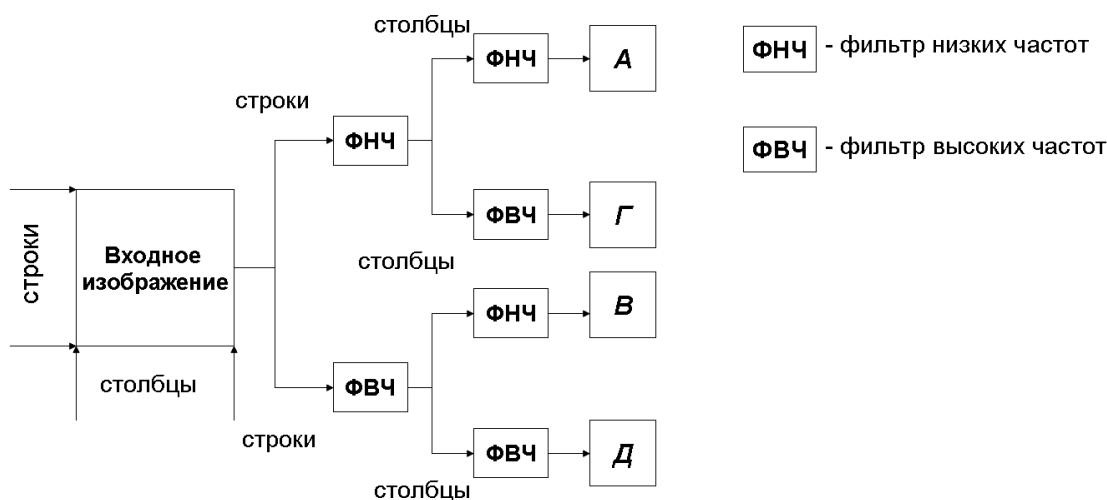


Рис. 2. Схема быстрого двумерного дискретного вейвлет-преобразования по Малла

Для одного из вычисленных признаков (среднее значение, рассчитанное по изображению аппроксимации) была выявлена следующая особенность: для тех областей, которые характеризуются повышенным содержанием гумуса, с увеличением уровня ДВП значение этого признака растёт линейно (рис. 3), в то время как для территорий с недостатком гумуса на графике того же признака наблюдается излом (рис. 4).

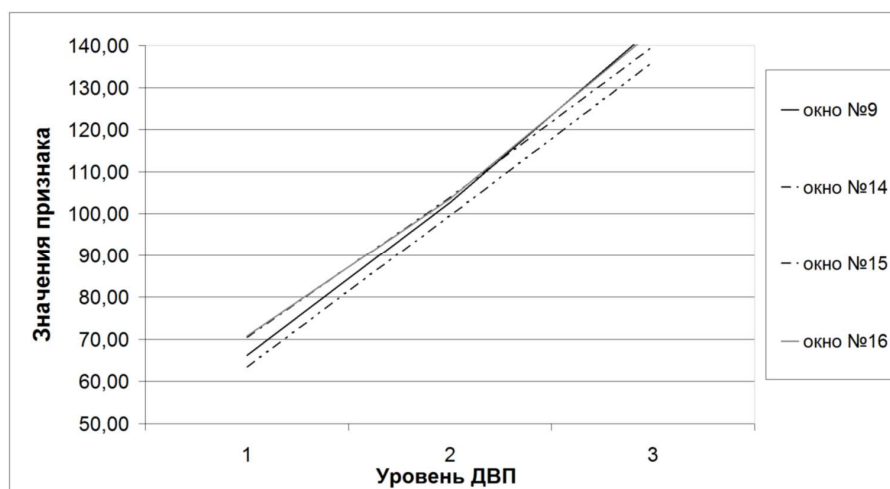


Рис. 3. График значений признака «среднее значение по изображению аппроксимации» в зависимости от уровня ДВП для участков с мощным гумусным слоем

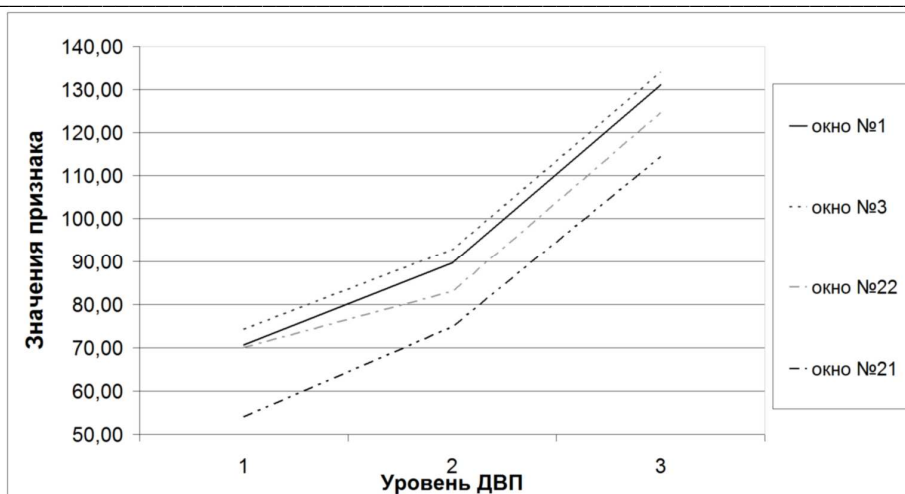


Рис. 4. График значений признака «среднее значение по изображению аппроксимации» в зависимости от уровня ДВП для участков, не характеризующихся богатым гумусным слоем

Для того, чтобы охарактеризовать эту особенность мы использовали характеристику ind , рассчитываемую по формуле $ind = app_1 - 2 \cdot app_2 + app_3$, где app_1 , app_2 , app_3 – значения признака «среднее значение по изображению аппроксимации», полученные при одноуровневом, двухуровневом и трехуровневом ДВП соответственно.

Таким образом, значения индикатора ind близкие к нулю соответствуют территориям с мощным гумусным слоем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате расчета индикатора ind по всему изображению и проведению бинаризации, получено изображение, представленное на рис. 5, а и показывающее хороший уровень соответствия с эталонными данными (рис. 5, б).

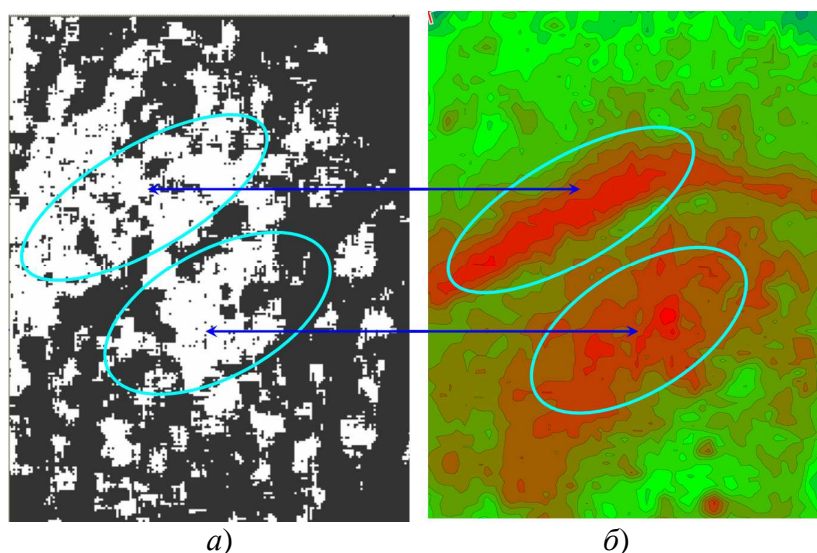


Рис. 5. Сопоставление результатов обработки снимка с БПЛА (а) с эталонной картой (б)

Белым областям на обработанном изображении можно поставить в соответствие красные области на эталонной карте. При этом отметим, что целью настоящей работы являлась разработка метода лишь для предварительной оценки перспективности территорий с точки зрения наличия археологического памятника. Поэтому неточности, выражающиеся в участках на обработанном изображении, отнесенных методом к областям с характерным свойством, но согласно эталонным данным, не являющиеся таковыми, считаем допустимыми, но требующими дополнительного исследования.

Предложенный метод был применен к трем изображениям (в разных диапазонах электромагнитного спектра) другого памятника – городища Гурьякар. На рис. 6 представлен снимок в БИК диапазоне, полученный с БПЛА (б), а также ортофотоплан этой местности (а).

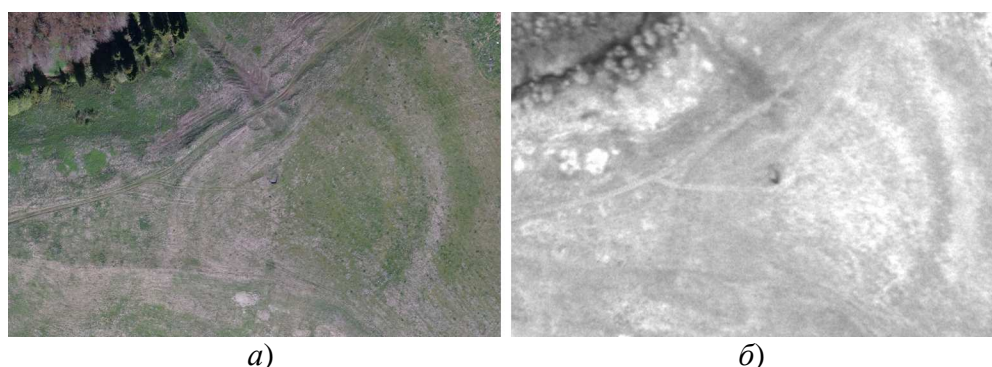


Рис. 6. Гурьякар: а) – ортофотоплан; б) – снимок, полученный с БПЛА в БИК диапазоне

После обработки изображения (рис. 6, б) с использованием индикатора *ind*, получено изображение, представленное на рис. 7, б. Красными и синими фигурами обозначены ярко выделяющиеся области на обработанном снимке. Отметим, что темным областям на рис. 7, б (синие фигуры) соответствуют участки с наиболее плотной растительностью на рис. 7, а, а светлому участку (красная фигура) соответствует область с вымытым гумусным слоем в русле ручья.

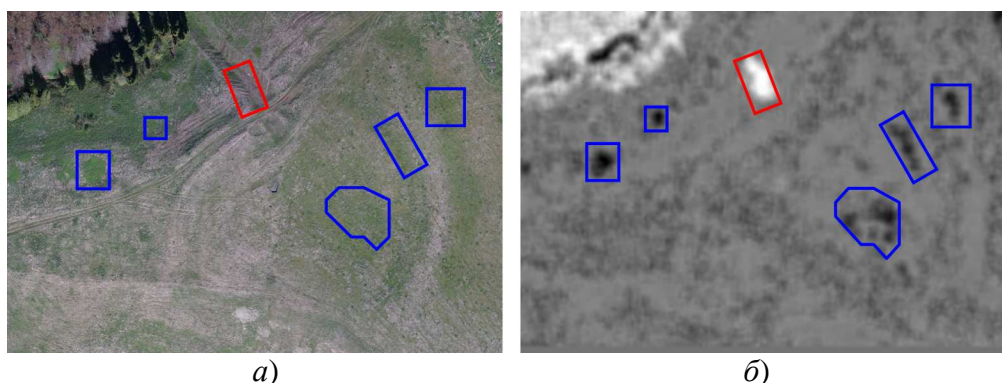


Рис. 7. Гурьякар: а) – ортофотоплан; б) – результат обработки снимка с БПЛА в БИК диапазоне с использованием индикатора *ind*; красная рамка – область без гумуса; синяя рамка – область с мощным гумусным слоем

Таким образом, разработанный индикатор позволяет обнаруживать две крайние ситуации: густая растительность, а значит высокое содержание гумуса и, наоборот, низкое содержание гумуса и, как следствие, отсутствие растительности.

В результате расчёта индикатора *ind* для снимка, полученного с БПЛА в красном спектральном канале (рис. 8, а) получено изображение, представленное на рис. 8, б.

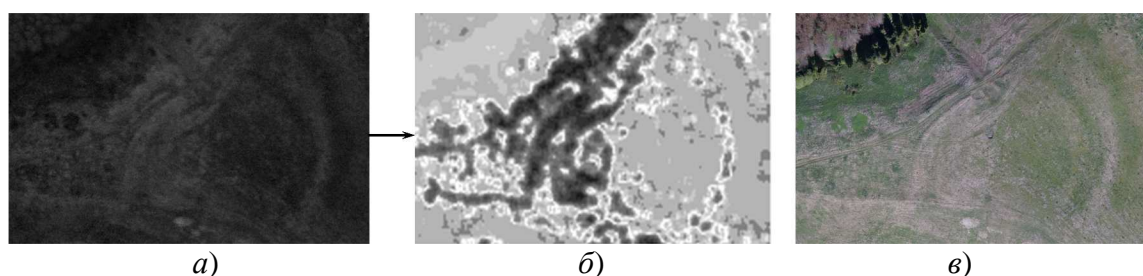


Рис. 8. Результат обработки снимка с БПЛА в красном спектральном канале и сопоставление с ортофотопланом: а) – снимок в красном канале; б) – результат обработки с использованием индикатора *ind*; в) – ортофотоплан Гурьякара

Обработка снимка с БПЛА в зелёном спектральном канале (рис. 9, а) тем же способом (индикатор *ind*) привела к изображению, представленному на рис. 9, б.

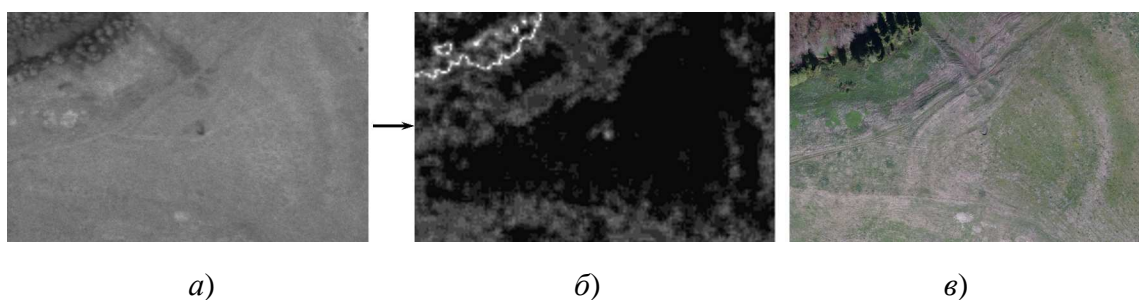


Рис. 9. Результат обработки снимка с БПЛА в зелёном спектральном канале и сопоставление с ортофотопланом: а) – снимок в зелёном канале; б) – результат обработки с использованием индикатора *ind*; в) – ортофотоплан Гурьякара

Применение разработанного метода обработки изображений к снимкам, полученным в разных спектральных каналах, позволяет получать изображения, на которых выделяются разные участки, отличающиеся своими химико-биологическими свойствами.

Таким образом, разработанный метод обработки изображений позволяет использовать высокую информативность мультиспектральной съемки, то есть, расширяет возможности применения данных ДЗЗ. Отметим, что по сравнению с существующими методиками, основанными на применении вегетационных индексов, настоящий метод можно применять к снимку, полученному даже в одном диапазоне электромагнитного спектра. Выбор этого диапазона зависит от поставленной задачи, а также от времени года съемки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод выявления областей с характерными свойствами по изображениям с БПЛА на основе многоуровневого вейвлет-преобразования.

Материалы выполненных исследований показывают, что применение многоуровневого вейвлет-преобразования к данным ДЗЗ позволяет обнаруживать и оконтуривать участки местности, имеющие определённые химико-биологические свойства растительности, обусловленные наличием под земной поверхностью археологических памятников. Анализ полученных результатов для двух археологических памятников (Кушманское III Селище и городище Гурьякар) даёт возможность определять территории, подлежащие более детальным геофизическим и археологическим исследованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
2. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК-Пресс, 2005. 304 с.
3. Назмутдинова А. И., Милич В. Н. Исследование зависимости результатов классификации мезозональных изображений лесной растительности от параметров вейвлет-преобразования // Автометрия. 2016. Т. 52, № 3. С. 20-27.
4. Mozzi P., Fontana A., Ferrarese F., Ninfo A., Campana S., Francese R. The Roman City of Altinum, Venice Lagoon, from Remote Sensing and Geophysical Prospection // Archaeological Prospection, 2016, no. 23, pp. 27-44.
5. Иванова М. Г., Журбин И. В., Модин Р. Н. Кушманский комплекс памятников X-XIII веков в бассейне реки Чепцы: основные результаты междисциплинарных исследований // Вестник Удмуртского университета. Серия История и филология, 2017. Т. 27, № 4. С. 581–586.
6. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Elektronische Ressource. Academic Press, 1999. 637 p.

APPLICATION POSSIBILITIES OF WAVELET TRANSFORM AT DETECTION OF AREAS WITH CHARACTERISTIC PROPERTIES ON DATA OF EARTH REMOTE SENSING

Bazhenova A. I., Milich V. N.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

SUMMARY. The detecting problem of the areas with characteristic properties on the example of the detecting problem of the areas promising from the point of view of the presence of archaeological monuments is considered in this paper. The image obtained by an unmanned aerial vehicle in the near infrared range on the territory of Kushman III Settlement is used. The results of geophysical studies confirmed by excavations are used as a reference data. An image processing method based on the calculation of wavelet-features is proposed. The statistical characteristics of images obtained as a result of a two-dimensional discrete wavelet transform are calculated along the scan line in a window of size $k \times k$ and step h . The analysis of the obtained data allowed us to identify the regularity observed for a variety of images with similar properties. This regularity is that with an increase in the wavelet transform level the wavelet-feature “average value of the approximation image” behaves differently for images of areas that are characterized by a powerful humus layer and areas that are not rich by humus. The indicator *ind* is used to describe this pattern. The calculation of this indicator for the entire image, by moving a window of size $k \times k$ with step h , made it possible to obtain an image showing a high level of visual correspondence to the reference data. The developed processing method was used for images of another monument - fortified settlement Guryakar. The results of the method application confirm the ability of the method to detect areas with thick layer of humus. The developed method can be used for detecting of the areas subject to more detailed geophysical and archaeological research.

KEYWORDS: unmanned aerial vehicles, image areas with characteristic properties, wavelet-transform, geophysics, archaeology.

REFERENCES

1. Shovengerdt R. A. *Distantionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazheniy* [Remote sensing. Methods and models of image processing]. Moscow: Tehnosfera Publ., 2010. 560 p.
2. Smolencev N. K. *Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB* [Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in matlab]. Moscow: DMK-Press Publ., 2005. 304 p.
3. Nazmutdinova A. I., Milich V. N. Dependence of the results of classification of multispectral images of forest vegetation on wavelet-transform parameters. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 231-237. <https://doi.org/10.3103/S8756699016030031>
4. Mozzi P., Fontana A., Ferrarese F., Ninfo A., Campana S., Francese R. The Roman City of Altinum, Venice Lagoon, from Remote Sensing and Geophysical Prospection. *Archaeological Prospection*, 2016, no. 23, pp. 27-44. <https://doi.org/10.1002/arp.1520>
5. Ivanova M. G., Zhurbin I. V., Modin R. N. *Kushmanskiy kompleks pamyatnikov X-XIII vekov v bassejne reki Cheptsy: osnovnyye rezultaty mezhdistsiplinarnykh issledovaniy* [Kushmansky complex of monuments of the X-XIII centuries in the Cheptsy river basin: main results of interdisciplinary research]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Istoriya i filologiya* [Bulletin of Udmurt University. Series History and Philology], 2017, vol. 27, no. 4, pp. 581-586. http://ru.history.vestnik.udsu.ru/files/original_articles/vuu_17_054_10.pdf
6. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. Elektronische Ressource. Academic Press, 1999. 637 p. <https://archive.org/details/AWaveletourOfSignalProcessingMallat/page/n9>

Баженова (Назмутдинова) Айгуль Илсуровна, кандидат технических наук, научный сотрудник,
Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(950)1743743, e-mail: aigul_bazh@udman.ru

Милич Владимир Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(904)3152024, e-mail: mili@udman.ru