УДК 528: 873

М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров

Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям

Приводится описание методики обнаружения водных объектов из многоспектральных спутниковых измерений прибором Landsat-8. Обнаружение проводится на основе сравнительного анализа значений водных индексов NDWI, MNDWI, NDMI, WRI, NDVI и AWEI. Проводится описание результатов обработки реальных изображений для территории в районе г. Томска.

Ключевые слова: спутниковые измерения, водные объекты, водные индексы, водная маска.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108

Климатические изменения, которые произошли за последние десятилетия, ускорившийся темп урбанизации и технологического развития приводят к изменениям всех компонент атмосферы и поверхности Земли. Одной из таких компонент являются поверхностные водные объекты планеты (реки, грунтовые воды, озера). Вода является важным элементом для существования различных экосистем, в том числе и для существования человечества. Как отсутствие, так и избыток воды приводят к чрезвычайным изменениям в любых отраслях народного хозяйства. Поэтому обнаружение водных объектов и последующий контроль являются важным процессом в научных и практических исследованиях. Фактически в настоящее время отсутствует мониторинг водных объектов, который показывает изменение числа водных объектов и их площади, береговой линии и их типа.

Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет проводить регулярные многоспектральные измерения земной поверхности. Математические методы обработки данных дистанционного зондирования позволяют получать информацию о пространственно-временных параметрах поверхности Земли, в том числе и водных объектов. Одним из таких параметров является водная маска, позволяющая на спутниковом изображении определить пиксели, в которых находятся водные объекты. Целью данной работы является разработка методики дешифрирования многоспектральных изображений спутникового прибора Landsat-8 для определения водных объектов и построения водных масок.

Постановка задачи

Мониторинговые спутниковые системы регулярно передают многоспектральные изображения поверхности Земли [1, 2]. Основой измерений является спектральная специфика отражения различных типов поверхности и рельеф [3]. На рис. 1 представлены спектральные кривые коэффициента отражения водной поверхности.

Одним из популярных спутниковых приборов среднего пространственного разрешения, измеренные многоспектральные изображения которых применяются в научных и практических задачах, является Landsat-8 [<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>]. Приборы, расположенные на борту космического

аппарата, позволяют измерять многоспектральные (от видимой до ИК-области спектра) изображения земной поверхности. Полученные изображения необходимо корректировать, чтобы компенсировать вклад атмосферы, связанный с поглощением газами и рассеиванием излучения аэрозолями. Для получения однородных по качеству изображений земной поверхности необходимо проводить топографическую коррекцию, которая учитывает эффекты рельефа местности, зенитного и азимутального угла Солнца и расстояния между Землей и Солнцем [4]. Результат применения радиометрической, атмосферной и топографической коррекции для пятого спектрального канала Landsat-8 приведен на рис. 2.

Рис. 1. Спектральные кривые коэффициента отражения водной поверхности (C1, ..., C3 — вода пресная, различной мутности, C1 — наиболее чистая); K1, ..., K4 — четыре первых спектральных канала Landsat-8

В настоящее время основным и наиболее распространенным методом дешифрирования является визуальное дешифрирование, когда распознавание водных объектов на основе цветовых синтезированных изображений. Главная проблема этого подхода связана с анализом нескольких изображений одновременно. Это делается для того, чтобы детализировать береговую линию, которая на синтезированных изображениях отображается по-разному. Процесс дешифрирования таким подходом трудоемок и длителен [5].

а

б

Рис. 2. Результаты радиометрической, атмосферной и топографической коррекции для пятого спектрального канала Landsat-8: а – до коррекции; б – после коррекции

Процесс поиска водных объектов на основе набора измеренных многоспектральных изображений позволяет обнаруживать их по характеристикам отражательной способности природных объектов [6–8] (см. рис. 1). Водные объекты характеризуются самыми низкими значениями коэффициентов отражения среди других природных объектов. При этом все другие природные объекты даже в состоянии увлажнения имеют больший коэффициент отражения. Этот факт используется при обнаружении водных объектов на измеренном изображении.

Методика выделения водных объектов

Для обнаружения водных объектов по космическим многоспектральным изображениям широко используются следующие индексы: NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI, AWEI. Автоматизированный индекс выделения воды (AWEI) позволяет эффективно разделить водные и неводные пиксели за счет одновременного использования четырех спектральных каналов Landsat-8. Коэффициенты в выражении для этого индекса эмпирически подобраны таким образом, чтобы наблюдалось максимальное отличие водных пикселей от пикселей различных типов растительного покрова. Нормализованный вегетационный индекс NDVI является наиболее известным индексом, используемым на практике, и показывает наличие и состояние растительности на момент измерений. Основой индекса является контраст отражательных характеристик с максимальным погло-

щением пигментом хлорофилла (красный канал) и высокой отражательной способностью растительного покрова (инфракрасный канал). Индекс нормированной разности вод (NDWI) рассчитывается на основе канала ближнего инфракрасного диапазона и канала в коротковолновом инфракрасном (SWIR). В табл. 1 представлены формулы для вычислений индексов, используемых в работе.

Таблица 1
Многоспектральные индексы, используемые для определения водных объектов

Индекс	Выражение	Диапазон значений
Normalized Difference Water Index	$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	Вода имеет положительное значение
Normalized Difference Moisture Index	$NDMI = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$	Вода имеет положительное значение
Modified Normalized Difference Water Index	$MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR)$	Вода имеет положительное значение
Water Ratio Index	$WRI = (GREEN + RED) / (NIR + MIR)$	Вода имеет значение больше 1
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$	Вода имеет отрицательное значение
Automated Water Extraction Index	$AWEI = 4 \times (GREEN - MIR) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR)$	Вода имеет положительное значение

Выбор территории исследований

С источника данных [https://aws.amazon.com/ru/public-datasets/landsat/] были получены многоспектральные изображения спутника Landsat-8. Космические изображения связаны с координатами (56,96209; 82,34735); (57,04714; 86,38850); (54,73712; 82,60631); (54,81538; 86,42267). Каждое изображение имеет одиннадцать спектральных каналов с пространственным разрешением 30 м (8281 строка и 8191 столбец). Эта область интересна тем, что содержит разнообразные физико-географические зоны с богатой почвой и растительностью, включая множество водных объектов. Особенностью этой территории является наличие двух больших рек – Томь и Обь, а также мелких и крупных озер. Для исследований были взяты спутниковые снимки за май, июнь, август, октябрь 2016 г. с минимальным содержанием облачности (< 5%) или безоблачные.

Результаты выделения водных объектов по данным Landsat-8

Значения для индексов AWEI, NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI лежат в диапазонах [–1; 1]. В табл. 1 указаны диапазоны значений, при которых пиксель с наибольшей вероятностью связан с водным объектом. Для каждого индекса строились фильтры на основе учета диапазона значений указанных выше индексов, позволяющих выделять водные объекты

(бинаризация изображений: 0 – неводные объекты и 1 – водные объекты). Проводилось сравнение водных масок для каждого фильтра с эталонной маской водного объекта. Эталонная водная маска с разрешением 30 м получена при построении рельефа местности, полученного в проекте «Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)» [https://dds.cr.usgs.gov/srtm].

Оценка точности обнаружения водных объектов получена путем деления суммы верно классифицированных пикселей водного объекта, полученного с помощью водного индекса, к общему числу пикселей эталонной маски:

$$O = 100 \times |N_w - N_{wm}| / N_{wm}, \% \quad (1)$$

Здесь N_w – число водных пикселей анализируемого изображения и N_{wm} – число водных пикселей эталонной маски.

Для оценки точности классификации типов поверхности по спутниковым изображениям принято рассчитывать коэффициент Каппа [10], значения которого лежат в диапазоне $[-1; 1]$. Положительное значение коэффициента Каппа показывает высокую точность, а нулевое и отрицательное значение показывает отсутствие корреляции в классификации.

$$Ka = (N \sum X_{ii} - \sum (X_{io} X_{oi})) / (N^2 - \sum (X_{io} X_{oi})),$$

где N – число пикселей на изображении; $i = 1; P$ – число классов; $\sum X_{ii}$ – сумма элементов матрицы.

Полученные результаты

В табл. 2 приведены результаты оценки точности выделения водных объектов для водных индексов AWEI, WRI, NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI. Видно, что точность обнаружения водных объектов высокая и максимально близкая к эталонной маске. Для некоторых индексов были проведены дополнительные расчеты, учитывая различные варианты диапазонов значений принадлежности пикселей к водным объектам. Это позволило более точно найти пороги значений, при которых пиксель можно считать принадлежащим водным объектам.

Таблица 2
Точность выделения водных объектов для водных индексов

Название метода	Диапазон значений поиска	Общая точность, %	Коэффициент Каппа
WRI	>1,0	98,7	0,975
NDWI	>0,0	98,1	0,987
	>0,18	98,7	0,975
MNDWI	>0,0	98,4	0,969
	>0,18	98,7	0,975
AWEI	>0,0	98,7	0,974
	>0,16	99,3	0,987
NDVI	-0,45 ... -0,25	98,7	0,974
	<0,0	93,4	0,852
NDMI	>0,0	98,1	0,962
	>0,14	98,0	0,96

В табл. 3 приведены изображения водных масок, полученных для различных водных индексов.

Таблица 3

Визуализация маски водных индексов

Индекс	Изображение маски водных объектов
NDVI
AWEI
NDWI
NDMI
MNDWI
WRI

Сравнивая результаты, представленные в табл. 2 и 3, можно отметить, что наиболее хорошо выделяется водный объект с помощью индекса AWEI. Следует отметить, что возможно улучшение точности восстановления водных объектов за счет более точной атмосферной коррекции принимаемых изображений, а также учета спектральной специфики каждого канала, участвующего в расчете водных индексов.

Разносторонние исследования водных объектов суши (с помощью наземных, аэровоздушных и космических приборов) необходимы с практической и научной сторон. Сущность использования много-спектральных данных космических изображений сводится к дешифрированию и выявлению объектов местности. Среди найденных объектов по определенным признакам происходит выделение исследуемого объекта. Далее появляется возможность устанавливать именно для объекта изучения качественные и количественные характеристики.

Заключение

Данная статья показывает сравнительный анализ различных водных индексов, построенных на основе значений для спектральных каналов Landsat-8. На основе водных индексов, строятся фильтры, позволяющие на изображениях земной поверхности выделять водные объекты (реки, озера, искусственные водохранилища). Перед расчетом водных индексов проводится радиометрическая и атмосферная коррекция, позволяющая учесть условия во время съемки и скорректировать интервал яркости получаемого изображения. Результаты обработки реальных данных показали, что наилучшим водным индексом является AWEI среди NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI, что показывает визуальный анализ водных масок и результаты оценки точности. Приведены водные маски для каждого индекса.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования», а также в рамках проекта РФФИ № 16-05-00901.

Литература

1. Дворкин Б.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б.А. Дворкин, С.А. Дудкин // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 16–21.
2. Комарова А.Ф. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова / А.Ф. Комарова, И.В. Журавлева, В.М. Яблоков // Принципы экологии. – 2016. – № 1. – С. 40–47.

3. Кондратьев К.Я. Аэрокосмические исследования почв и растительности / К.Я. Кондратьев, В.В. Козодеров, П.П. Федченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 231 с.

4. Егоров В.А. Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности / В.А. Егоров, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 5. – С. 192–201.

5. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: АспектПресс, 2004. – 184 с.

6. Modelling spatial-temporal change of Poyang Lake using multitemporal Landsat imagery / F. Hui, B. Xu, H. Huang, Q. Yu, P. Gong // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29, No. 20. – P. 5767–5784.

7. Ji L. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index / L. Ji, L. Zhang, B. Wylie // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 75, No. 11. – P. 1307–1317.

8. Sun F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery / F. Sun, W. Sun, J. Chen, P. Gong // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – Vol. 33, No. 21. – P. 6854–6875.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа, профессор Юргинского технологического института, филиала Национального исследовательского Томского политехнического университета
Тел.: (382-2) 70-15-36, 8-960-975-27-85
Эл. почта: kataev.m@sibmail.com

Бекеров Артур Александрович

Аспирант Института мониторинга климатозоологических систем СО РАН, Томск
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: artur@bekerov.ru

Kataev M.Yu., Bekerov A.A.

Methodology of the water objects detection from multi-spectrum satellite measurements

The article describes the method of detecting water objects from multispectral satellite measurements with the Landsat-8 instrument. The detection is based on a comparative analysis of the values of the water indices NDWI, MNDWI, NDMI, WRI, NDVI and AWEI. The description of the results for processing real images of the Tomsk region territories is provided.

Keywords: satellite measurements, water objects, water indices, water mask.