

УДК 528.8.04

М.Ю. Катаев, А.К. Лукьянов, П.Н. Ткаченко

Методика определения времени вскрытия и замерзания реки по защищенным многоспектральным спутниковым данным и измерениям прибором MODIS

Наблюдение за поверхностными водами имеет важное значение для экологических и гидрологических исследований, а также для практического применения в МЧС. В данной статье рассматривается вопрос обнаружения и мониторинга поверхностных вод с помощью оптического дистанционного зондирования многоспектральным спутниковым прибором MODIS, кратко обсуждаются текущее состояние и проблемы в этой области. Обнаружение воды проводится на основе анализа значений вегетационных индексов NDVI, рассчитанных по измерениям в течение года, исходя из четкого разделения по величине значений индексов для растений, снега или воды. На основе этого анализа строится пространственно-временная маска водных объектов или маска, пиксели которой используются для определения времени вскрытия и замерзания реки. Для этого рассматриваются графики пространственно-временной динамики пикселей водной маски и строятся сглаженные значения. Следующий шаг связан с поиском в этих зависимостях времени вскрытия реки от зимнего льда и замерзания реки. В данной статье приводится описание обработки реальных измерений для территории междуречья Обь–Томь в районе г. Томска.

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

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-101-106

Поверхностные водные объекты (речные, водно-болотные, озерные и т.д.) относятся, в большей мере, к пресным водоемам, расположенным на поверхности Земли. К ним нельзя относить океаны, потому что они являются солеными и к тому же занимают почти 70% поверхности Земли [1]. Поверхностные водные объекты критически важны для человека, так как являются носителями пресной воды, необходимой для поддержания всех форм жизни. Кроме этого, водные объекты представляют собой важные компоненты гидрологического цикла, затрагивающие различные виды производства в сельском хозяйстве, электроэнергетики, транспорте, промышленности и т.д. Вариации состава и качества водных объектов воздействуют на природные ресурсы и человека, а также определяют состояние окружающей среды. Изменение объема поверхностных водных объектов обычно вызывает серьезные последствия в виде засухи или затоплений и поэтому крайне важно эффективно обнаруживать наличие водных объектов, количественно оценивать их объем и отслеживать динамику.

Технология дистанционного зондирования предлагает эффективные способы [2] наблюдения за поверхностью Земли, в том числе за поверхностными водными объектами. По сравнению с традиционным локальным способом измерения (отслеживание с помощью удаленных друг от друга датчиков уровня) дистанционное зондирование намного эффективнее ввиду способности регулярно проводить мониторинг поверхности Земли в различных участках электромагнитного спектра на больших территориях. Наборы данных дистанционного зондирования обеспечивают возможность анализа пространственно-временных наблюдений [3] ряда физических характеристик земной поверхности. Одной из таких характеристик является вегетационный индекс, ко-

торый может быть соответствующим образом использован для выделения водных объектов, картографирования и мониторинга их динамики.

Целью данной работы является разработка методики обработки многоспектральных изображений спутникового радиометра MODIS, определения территории, занимаемой реками, и построения водных масок для разных сезонов года. На основе полученной информации необходимо изучить время перехода воды от состояния льда в жидкое состояние и наоборот для территории р. Томь в районе г. Томска.

Спутниковые многоспектральные приборы

С момента появления первого спутника для изучения типов поверхности Земли (Landsat-1) в 1972 г. [4] спутниковые оптические датчики продемонстрировали свой потенциал для мониторинга типов и изменений земной поверхности. Динамика поверхностных вод является важным явлением изменения земного покрова [5]. Пространственное разрешение спутниковых приборов определяет уровень детализации поверхностных объектов, которые фиксируются на измеренных изображениях. Выделяют три группы приборов: низкое разрешение (> 250 м), среднее (5–250 м) и высокое (< 5 м).

Спутниковые приборы, обеспечивающие низкое пространственное разрешение, имеют недостаток слабой детализации объектов поверхности Земли, однако имеют хорошую информативность за счет высокого временного разрешения и широкого охвата территории. Примером является радиометр NOAA/AVHRR [6], разработанный для контроля океана и атмосферы, имеющий пространственное разрешение пикселя 1,1 км, полосу обзора 2500 км и получающий изображение всей поверхности Земли за один день. Результаты измерений этого спутникового прибора используют для обнаружения масштабных наводнений.

Самыми популярными спутниковыми приборами являются радиометры MODIS [7], которые имеют название Terra и Aqua и широко применяются во многих областях науки и практики для исследования сельскохозяйственной земли, изменения растительного покрова, водных объектов и мониторинга атмосферы. Данные измерений представляют собой 36 мультиспектральных полос с пространственным разрешением 250 м (видимая область), 500 м (ближняя инфракрасная) и 1000 м (ИК-область спектра). Другой прибор Suomi NPP-VIIRS [8] имеет ширину полосы обзора 3000 км, 22 спектральных канала в видимой и ИК-областях спектра, два пространственных разрешения: 375 и 750 м. Применение данных этого спутникового прибора аналогично радиометру MODIS [9]. Несмотря на то, что между двумя последними приборами есть небольшая разница в пространственном разрешении, прибор MODIS выглядит более предпочтительным для изучения динамики водных объектов, так как имеет время возвращения в ту же географическую точку 6 ч (учитывая два однотипных прибора), а NPP-VIIRS – 12 ч.

Существуют спутниковые спектральные инструменты среднего пространственного разрешения (10, 30 м) Landsat [10] и Sentinel [11], однако между их возвращением в ту же географическую точку проходит несколько дней (10, 16), что ограничивает их применение для целей исследования динамики водных объектов.

Постановка задачи

В настоящее время базовым и часто используемым видом изучения космических синтезированных изображений («естественные цвета») является визуальное дешифрирование. Для автоматизации процесса дешифрирования в большинстве методик используются различные подходы кластеризации, основанные на цветовых и/или текстурных показателях. Эти подходы являются объективными, однако зависимыми от множества факторов прохождения излучения через атмосферу и числа типов поверхности, попадающих в площадь того или иного пикселя изображения. Проблемой для обработки таких изображений является то, что типы поверхности имеют различную спектральную природу отражения, и сказывается влияние рельефа поверхности. Это приводит к тому, что возникают погрешности при отнесении различных измерений к одному и тому же классу типов поверхности. Вклад, связанный с влиянием состояния атмосферы на измерения, корректируется на этапе предварительной обработки [12].

Определение водных объектов осложняется рядом факторов, зависящих от времени измерений (времени суток и сезона года), что затрудняет создание стандартных автоматизированных алгоритмов. Также необходимо учитывать множество возможных изменений спектральных свойств водных объектов, их глубину и качество (мутность и наличие хлорофилла). Принципиальными для учета факторами являются: слабое изменение пространственных ха-

рактеристик пикселей изображения, связанных с рекой, с одной стороны, и их изменчивость, обусловленная температурой (утро–день–вечер), с другой стороны.

Алгоритм поиска пикселей, связанных с рекой, на основе измеренного многоспектрального изображения позволяет находить их по значениям отражательной способности водных объектов. Вода характеризуется низкими значениями спектральных коэффициентов отражения относительно других природных объектов [13], которые, даже в состоянии увлажнения, имеют больший коэффициент отражения. Эту зависимость используют для выделения водных объектов на измеренном изображении. Однако в некоторые моменты времени в воде возникают большие по площади ареалы водных растений, которые естественно имеют спектр отражения, отличный от воды, что приводит к ошибкам классификации типа поверхности.

Одной из важнейших для научных и практических целей задач является определение времени нахождения водного объекта в состоянии наличия или отсутствия льда на его поверхности. Важно детектировать не только время наступления того или иного состояния водного объекта, но и его длительность. Решение этой сложной задачи требует регулярных (ежедневных) измерений, которые в настоящее время осуществляет только прибор MODIS. Заметим, что мешающим фактором для решения задачи выделения водных объектов является облачность, которая может быть разрывной, сплошной или полупрозрачной [14].

Методика выделения водных объектов на основе вегетационного индекса

Принцип выделения поверхностных водных объектов из оптических спутниковых изображений заключается в учете информации о заведомо более низком спектральном коэффициенте отражения воды по сравнению с другими типами земной поверхности. Исходя из этого, были разработаны многочисленные методы для выделения водных объектов из изображений оптического диапазона спектра средствами дистанционного зондирования. Одним из простых подходов является применение инфракрасного диапазона для получения карты водных объектов [15]. Однако проблема с методами, работающими в ИК-области спектра, заключается в том, что применяемые правила классификации не позволяют построить точный и надежный алгоритм, так как очень сложно в этом диапазоне спектра отличить мокрую после дождя поверхность от водной поверхности. Простым и эффективным способом извлечения воды является использование спектральных коэффициентов отражения воды в двух или более спутниковых каналах видимой области спектра, что позволяет выявить различия между водными и неводными территориями. На основе такого подхода разработано множество индексов, позволяющих выделять площади поверхностных водных объектов или степени паводкового затопления [16, 17]. Одна-

ко в этом случае в летнее время сказывается наличие в воде растений, которые не позволяют с высокой точностью выделить водный объект.

Известен индекс влажности (TCW), полученный из шести спектральных спутниковых каналов, устанавливающий порог 0 или 1 для разделения водных и неводных объектов [18]. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является самым популярным по практическому применению при изучении типов поверхности и часто используется для обнаружения воды и наводнений в некоторых исследованиях. Известны и другие полезные индексы для выделения водных объектов, такие как нормализованный разностный водный индекс NDWI, его развитие mNDWI, WRI, AWEI и др. [19].

Для выделения водных объектов нами предлагается использовать информацию о пространственно-временном изменении вегетационного индекса, который в местоположении водных объектов имеет специфическое поведение, которое исследуется в данной статье.

Для исследований нами был выбран нормализованный вегетационный индекс NDVI, позволяющий не только выделить, но и определить состояние растительности. Индекс NDVI рассчитывается на основе двух спектральных каналов: красного канала (RED) и канала из ближней инфракрасной области (NIR). Используется разная величина отражения в NIR- и RED-каналах, что позволяет контролировать плотность и интенсивность роста зеленой растительности с использованием спектрального отражения солнечной радиации. Облака и снег имеют большее спектральное отражение в видимом диапазоне, чем в ближнем инфракрасном диапазоне, в то время как разница отражательной способности для горной поверхности и почвы практически равна нулю. Поэтому облака, вода и снег показывают отрицательные значения, а другие типы поверхности – значения, близкие к нулю или больше нуля.

Для вычисления вегетационного индекса используют следующую формулу:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

Вычисленные по текущим значениям много-спектральных изображений спутникового спектро-радиометра MODIS значения NDVI представляют оперативную информацию об эколого-климатическом состоянии. Также эти значения позволяют отслеживать динамику различных объектов на поверхности Земли. Большой пространственный охват спутниковых изображений дает возможность проводить мониторинг территорий, соразмерных с площадями областей (полоса 2300 км).

Предлагаемая методика

Сформированный ряд значений вегетационного индекса NDVI для одного пикселя изображения, полученных в течение года, связан с проблемой, ко-

торая заключается в пиковой структуре (рис. 1). Пиковая структура связана с появлением облачного покрова во время измерений (низкое значение вегетационного индекса). Некоторые небольшие вариации значений NDVI возникают вследствие изменения температуры, влажности и освещенности солнцем. Известно, что изучение формы временного ряда NDVI позволяет классифицировать типы растительности и их изменения в зависимости от различных факторов. Решение этой задачи требует разработки единого подхода для всех временных рядов NDVI, в которых отсутствует высокая изрезанность. Сглаживание временных рядов вегетационного индекса связано с проблемой выявления ложных провалов и пиков, которые обусловлены иными, чем влияние облачности, процессами.

На рис. 1 представлен ряд значений вегетационного индекса NDVI, рассчитанных для пикселей в районе г. Томска в 2017 г., где расположены хвойные растения. Видно, что исходный временной ряд NDVI содержит множество пиков и провалов. Такие ряды наблюдений для обнаружения временных интервалов чрезвычайно сложны и требуют предварительной обработки, формально, приведению к безоблачному случаю. В статье применяется методика сглаживания временных рядов NDVI [20], которая связана с идеей фильтрации шума с помощью алгоритма скользящей медианы.

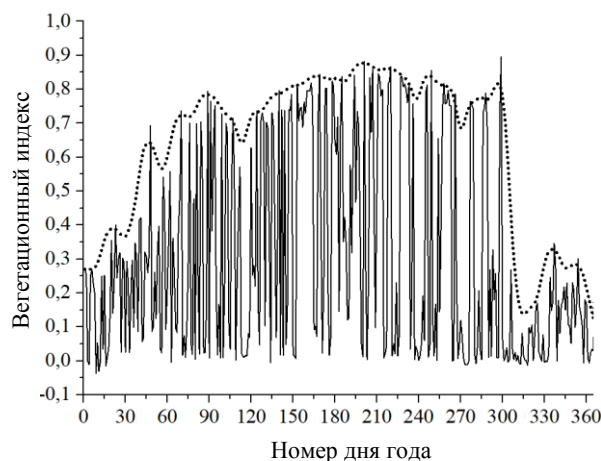


Рис. 1. Исходный (сплошная линия) и сглаженный (точки) ряд значений NDVI для хвойной растительности в 2017 г.

На рис. 2 показан результат сглаживания популярным на практике методом Савицкого–Голая ряда значений вегетационного индекса для пикселя, где расположены лиственные растения. Видно, что поведение NDVI для хвойных и лиственных растений в течение года разительно отличается, что позволяет использовать этот факт для решения задач дешифрирования.

На рис. 3 представлен временной ряд вегетационного индекса для пикселя, принадлежащего водному объекту р. Томи, хорошо отличающийся от пикселя, где наблюдается растительность (рис. 1 – хвойная и рис. 2 – лиственная). При сравнении результатов сглаживания значений вегетационного

индекса в течение года предлагаемым подходом и методом Савицкого–Голая [21] можно увидеть, что подход [20] выполняет эту процедуру более точно.

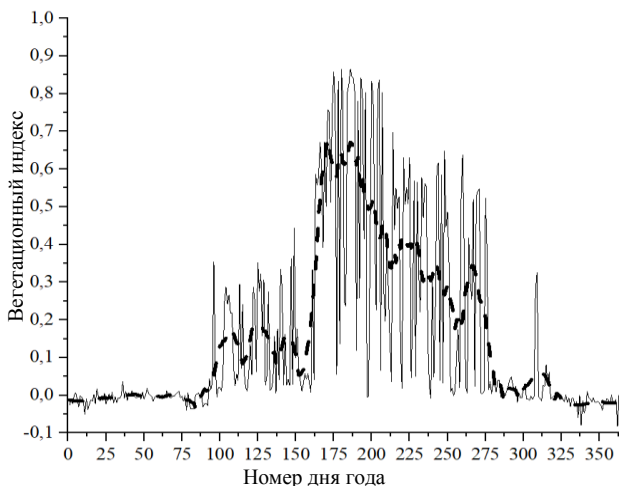


Рис. 2. Исходный ряд значений NDVI (сплошная линия) и сглаженный методом Савицкого–Голая (штриховая линия) для лиственной растительности в 2017 г.

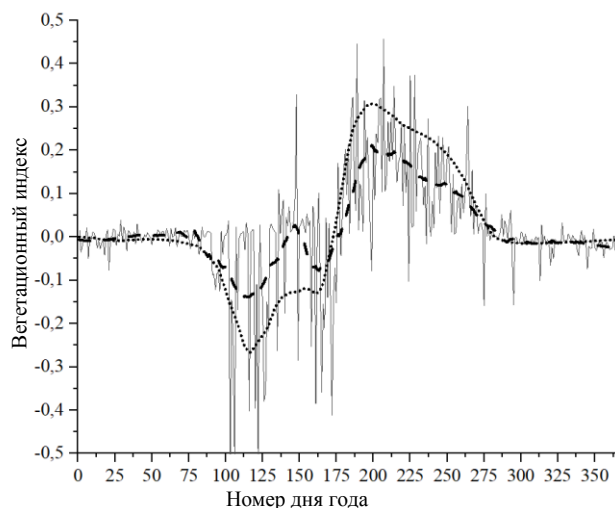


Рис. 3. Результат сглаживания значений NDVI (сплошная линия) для пикселя, попадающего в р. Томь, методом Савицкого–Голая (штриховая линия) и предлагаемым авторами подходом (точки) в 2017 г.

Анализ результатов

Состав водного объекта существенно зависит от географической широты и типа почв, через которые река протекает (камень, глина или песок). Это все определяет разнообразные физические и химические процессы, протекающие в толще воды под воздействием солнечного излучения и вариаций температуры. Для поиска времени начала ледохода (появление больших площадей воды) и замерзания воды (появление льда на реке) нами выполняется простая процедура временного анализа нормализованного вегетационного индекса. Эмпирическим путем было получено, что середина отрезка (см. рис. 3), начинающегося от нуля вегетационного индекса (80-й день) и минимума (115-й день), попадает на время ледохода (105-й день, или 15 апреля). В 2017 г. ледо-

ход прошел в городской черте именно 15 апреля, а это говорит о том, что такой подход показывает достоверное время ледохода.

Далее определяется время замерзания реки, когда вегетационный индекс останавливается на значении в районе нуля. Учитывая этот факт, замерзание воды в р. Томь начинается на 280-й день и завершается к 310 дню года. Середина отрезка определяется 295-м номером дня, или 22 октября, а реально река остановилась 24 октября. Из рис. 3 видно, что процесс замерзания более сжат во времени и составляет 30 дней, а вскрытие реки проходит примерно за 40 дней. Несмотря на некоторую неточность определения времени замерзания, подход является универсальным и позволяет строить динамику вскрытия реки по всей ее длине. Далее можно уже рассматривать влияние метеорологических параметров (температура, освещенность, влажность и т.д.) на время вскрытия и построение регрессионных моделей. Такие модели позволяют проводить прогнозные расчеты времени вскрытия и замерзания реки, что важно для народного хозяйства и МЧС.

Указанный выше подход легко переводится в автоматизированный алгоритм, который рассматривает пиксели спутникового изображения в течение года, находит связанные с водным объектом и детектирует временной интервал вскрытия и замерзания реки.

Заключение

Представлены результаты расчета времени вскрытия и замерзания водных объектов Западной Сибири на примере р. Томь в районе г. Томска. Проведен анализ спутниковых систем, данные которых можно применить для решения такой задачи. Для решения данной задачи предложен подход, связанный с использованием ежедневных данных измерений спутниковым спектрорадиометром MODIS, полученных в течение года. На основе данных измерений рассчитывается вегетационный индекс NDVI, который нормализуется с помощью процедуры сглаживания. Сглаженный ряд значений вегетационного индекса анализируется на предмет поиска временных отрезков, связанных с периодами вскрытия и замерзания реки. Рассматривая периоды времени, связанные с состоянием водных объектов, можно вычислить с достаточно хорошей точностью дни года, показывающие время вскрытия и замерзания реки. В статье рассматривается р. Томь в районе г. Томска. Так как река имеет достаточную длину и нельзя поставить датчики по всей её протяжённости, предлагаемая методика позволит с хорошей точностью прогнозировать периоды вскрытия и замерзания реки.

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. – СПб.: Гос. гидрологический ин-т, 2008. – 600 с.
2. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Криштопов, А.И. Кудря. – М.: Техносфера, 2020. – 482 с.

3. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.

4. The global Landsat archive: Status, consolidation and direction / M.A. Wulder, J.C. White, T.R. Loveland, C.E. Woodcock, A.S. Belward, W.B. Cohen, E.A. Fosnight, J. Shaw, J.G. Masek, D.P. Roy // *Remote Sens. Environ.* – 2016. – Vol. 185. – P. 271–283.

5. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 г.». – М.: НИИ-Природа, 2019. – 290 с.

6. National Centers for Environmental Information. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov> (дата обращения: 13.04.2022).

7. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). – URL: <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS> (дата обращения: 13.04.2022).

8. Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). – URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 13.04.2022).

9. MODIS and VIIRS calibration and characterization in support of producing long-term high-quality data products / X. Xiong, A. Angal, T. Chang, K. Chiang, A. Wu // *Remote Sens.* – 2020. – Vol. 12. – P. 3167–3172.

10. Landsat Science. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 13.04.2022).

11. Sentinel Online. – URL: <https://sentinels.copernicus.eu> (дата обращения: 13.04.2022).

12. Hadjimitsis D.G. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs / D.G. Hadjimitsis, C.R.I. Clayton, V.S. Hope // *International Journal of Remote Sensing.* – 2004. – Vol. 25(18). – P. 3651–3674.

13. The ASTER spectral library version 2.0. / A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, G. Rivera // *Remote Sens Environ.* – 2009. – Vol. 113. – P. 711–716.

14. Чернокульский А.В. Климатология облачности в арктических и субарктических широтах по спутниковым, наземным наблюдениям и данным реанализа // *Солнечно-земная физика.* – 2012. – Вып. 21. – С. 73–78.

15. Frazier P.S. Water body detection and delineation with Landsat TM data / P.S. Frazier, K.J. Page // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* – 2000. – Vol. 66. – P. 1461–1468.

16. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G.L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, S.R. Proud // *Remote Sensing of Environment.* – 2014. – Vol. 140. – P. 23–35.

17. Катаев М.Ю. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // *Доклады ТУСУР.* – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 105–108.

18. Carlson T.N. A method to make use of thermal infrared temperatures and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover / T.N. Carlson, R.R. Gillies, E.M. Perry // *Remote Sensing Reviews.* – 1994. – Vol. 9. – P. 161–173.

19. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI / W. Li, Z. Du, F. Ling, D. Zhou, H. Wang, Y. Gui, X. Zhang // *Remote Sensing.* – 2013. – Vol. 5(11). – P. 5530–5549.

20. Катаев М.Ю. Методика выравнивания временных рядов вегетационного индекса NDVI, полученных по данным спектрорадиометра MODIS / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров, А.К. Лукьянов // *Доклады ТУСУР.* – 2016. – № 1. – С. 35–39.

21. Savitzky A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M.J.E. Golay // *Anal. Chem.* – 1964. – Vol. 36. – P. 1627–1639.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-7710-5463
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Лукьянов Андрей Кириллович

Канд. техн. наук, доцент каф. АСУ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9290-4450
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-953-911-61-97
Эл. почта: lukyjanov.ak@asu.tusur.ru

Ткаченко Павел Николаевич

Канд. техн. наук, нач. каф. оперативного управления мероприятиями Российской системы чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны Академии гражданской защиты МЧС России Соколовская ул., стр. 1А, г. Химки, Московская обл., Россия, 141435
Тел.: +7 (498-6) 99-06-80
Эл почта: tkachenko.p.n@amchs.ru

Kataev M.Yu., Lukyanov A.K., Tkachenko P.N.

Method for determining the time of opening and freezing of the river by protected multispectral satellite data and measurements by the MODIS instrument

An observation of surface waters is of a great importance for environmental, hydrological research, as well as practical applications and for the Russian Ministry of Emergency Situations. This article deals with the issue of detection and monitoring of surface waters using optical remote sensing by the MODIS multispectral satellite instrument. The current status and problems in this area are briefly discussed. The water detection is based on an analysis of NDVI vegetation index values calculated from measurements throughout the year from a clear division by value of plant, snow or water index values. Based on this, a spatio-temporal mask of water objects or a mask is built, the pixels of which are only used to analyze the values of the vegetation index. Next, the graphs of spatio-temporal dynamics of water mask pixels and construct smoothed values are considered. The following step is related to the search in these dependencies for the moment of opening of the river from winter ice and freezing of the river. A description is given of the processing of real measurements for the territory of the Ob-Tom interfluvium, in the region of the city of Tomsk.

Keywords: satellite measurements, water bodies, water indices, water mask, time.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-101-106

References

1. *Vodnye resursy Rossii i ih ispolzovanie* [Water resources of Russia and their use]. Ed. I.A. Shiklomanova, St. Petersburg: State Hydrological Institute., 2008, 600 p. (in Russ.).

2. Gruzдов V.V., Kolkovskiy Yu.V., Krishtopov A.V., Kudrya A.I. *Novye tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [New technologies for remote sensing of the Earth from space]. Moscow, Technosfera, 2020, 482 p. (in Russ.).

3. Chandra A.M., Gosh S.K. *Distantionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* [Remote sensing and geographic information systems]. Moscow, Technosfera, 2008, 312 p. (in Russ.).
4. Wulder M.A., White J.C., Loveland T.R., Woodcock C.E., Belward A.S., Cohen W.B., Fosnight E.A., Shaw J., Masek J.G., Roy D.P. The global Landsat archive: Status, consolidation and direction. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, no. 4, pp. 271–283.
5. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu»* [State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2018»]. Moscow, NIA-Priroda, 2019, 290 p. (in Russ.).
6. National Centers for Environmental Information. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov> (Accessed: April 12, 2022).
7. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Available at: <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS> (Accessed: April 12, 2022).
8. Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov> (Accessed: April 12, 2022).
9. Xiong X., Angal A., Chang T., Chiang K., Wu A. MODIS and VIIRS calibration and characterization in support of producing long-term high-quality data products. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, pp. 3167–3172.
10. Landsat Science. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (Accessed: April 12, 2022).
11. Sentinel Online. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu> (Accessed: April 12, 2022).
12. Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25(18), pp. 3651–3674.
13. Baldrige A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, pp. 711–716.
14. Chernokulsky A.V. [Climatology of cloudiness in the arctic and subarctic latitudes according to satellite, ground-based observations and reanalysis data]. *Solar-terrestrial Physics*, 2012, vol. 21, pp. 73–78 (in Russ.).
15. Frazier P.S., Page K.J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, vol. 66, pp. 1461–1468.
16. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 140, pp. 23–35.
17. Kataev M. Yu., Bekerov A. A. [Methods for detecting water objects by multispectral satellite measurements]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 105–108 (in Russ.).
18. Carlson T.N., Gillies R.R. A method to make use of thermal infra-red temperatures and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, vol. 9, pp. 161–173.
19. Li W., Du Z., Ling F., Zhou D., Wang H., Gui Y., Zhang X. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5(11), pp. 5530–5549.
20. Kataev M.Yu., Bekerov A.A., Lukyanov A.K. [Method for alignment of time series of vegetation index NDVI obtained from MODIS spectroradiometer data]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, no. 1, pp. 35–39 (in Russ.).
21. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, vol. 36, pp. 1627–1639.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-7710-5463
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Andrey K. Lukyanov

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor,
Department of Automated Control Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID (ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9290-4450>)
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-953-911-61-97
Email: lukyanov.ak@asu.tusur.ru

Pavel N. Tkachenko

Doctor of Science in Engineering,
Head of Department of Operational Management,
Civil Defense Academy of the Ministry
of Emergency Situations of Russia
1A, Sokolovskaya st., Khimki, Moscow Oblast, 141435
Phone: +7 (498-6) 99-06-80
Email: tkachenko.p.n@amchs.ru