



www.volsu.ru

DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2017.1.7>

УДК 502.57

ББК 26.222

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА¹

Алёна Николаевна Преснякова

Студентка института математики и информационных технологий,
Волгоградский государственный университет
a.n.presnyakova@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Андрей Владимирович Писарев

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
pisarev@volsu.ru, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Сергей Сергеевич Храпов

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
khrapov@volsu.ru, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Был проведен отбор космических снимков Landsat и Sentinel за различные промежутки времени, соответствующие периоду половодий 2013–2016 годов. Разработана технология дешифрирования данных ДЗЗ, основанная на алгоритмах поиска небольших объектов гидрографии. Для этого был разработан программный модуль для многослойной обработки спутниковых данных в системе GRASS GIS. Определены интегральные показатели затопления Волго-Ахтубинской поймы за несколько лет с помощью разных методов определения водной поверхности.

Ключевые слова: геоинформационные системы, мониторинг паводков, ДЗЗ, GRASS GIS, Landsat, Sentinel.

Введение

В настоящее время становится актуальным вопрос мониторинга затоплений пойменных территорий [1; 7; 10]. Особо стоит отметить, что из-за сложной разветвленной гидросистемы, включающей тысячи небольших водных объектов, наблюдаются трудности с определением зон затопления. Полевые исследования требуют значительных ресурсов, и за время половодья сложно исследовать всю местность. Аэрофотосъемка также требует значительных ресурсов и сильно зависит от погодных условий. Спутниковое дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет получить характеристику природных явлений, в том числе без привязки к погодным условиям и времени суток.

Территория Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) представляет собой междуречье Волги и Ахтубы общей площадью 14 000 км². Площадь поймы в Волгоградской области составляет 1 538,5 км² и включает три административных района: Среднеахтубинский, Светлоярский и Ленинский. Ежегодно во второй половине весны на территории ВАП наблюдается искусственный паводок, направленный на сохранение биоразнообразия поймы и обеспечение проживания жителей ВАП [4]. Временная зависимость расходов воды в реке или другом водотоке за год, несколько лет или часть года (сезон, половодье или паводок) называется гидрографом. Особо выделим гидрографы паводков 2015 и 2016 годов. Первый выражается своей маловодностью (667 865 м³), второй — наоборот, своей многоводностью (1 371 555 м³).

Отметим две космические программы, предоставляющие открытый доступ к пространственным данным: Landsat и Sentinel. Landsat — научная программа NASA, стартовавшая в 70-х гг. прошлого века и успешно продолжающаяся сейчас. Landsat-8 — седьмой американский спутник дистанционного зондирования Земли, успешно выведенный на орбиту и передающий данные с 2013 года. Основная задача — сохранение и сбор многоспектральных изображений с пространственным разрешением 30 м (один канал имеет разрешение 15 м, что позволяет повысить детализацию) с периодичностью съемки 8 дней. В 2014 г. был запущен первый из двух космических аппаратов Sentinel-1A — европейский спутник ДЗЗ, входящий в объединенную группировку космических аппаратов по глобальному мониторингу окружающей среды и безопасности «Copernicus». Данные Sentinel-1 включают радарные снимки с разрешением от 5 до 40 метров. Периодичность съемки составляет 12 дней, однако со второй половины 2016 г., с запуском второго спутника Sentinel-1B, промежуток уменьшился до 6 дней [8]. Также программа Sentinel включает спутник Sentinel-2 с аппаратурой, схожей со спутником Landsat-8, выполняющим аналогичные задачи [3]. Для территории ВАП было отобрано 7 снимков Landsat-8, приходящихся на половодья 2013–2016 годов. Малое количество изображений, несмотря на достаточно высокую периодичность съемки, обусловлено сильной облачностью исследуемой территории. Для территории ВАП на период пика половодья был выбран 1 снимок за 2015 г. (13 мая) и 4 за 2016 г. (25 апреля, 2, 14, 19 мая).

1. Технология обработки данных Sentinel-1

Данные радарной съемки Sentinel-1 представлены в «сыром виде», потребовалась дополнительная обработка, которая выполнялась в SNAP — специализированном ПО для обработки SAR-снимков [3]. Технология обработки снимков состояла в следующем: 1) создание проекта, включающего базовый слой исследуемой территории в проекции WGS-84; 2) калибровка данных; 3) корректировка по местности; 4) фильтрация

спекл-шума; 5) бинаризация снимка. Гистограмма обработанного радарного изображения состоит из двух ярко выраженных пиков различной величины (рис. 1). Таким образом, объекты на карте разбиваются на два класса: водный слой (первый пик, с меньшими значениями) и слой остальных объектов (второй пик, с большими значениями).

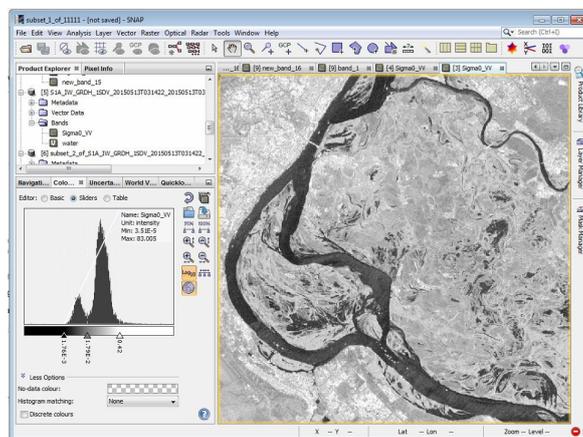


Рис. 1. Обработка данных территории ВАП с использованием программы SNAP

В результате обработки снимков двух типов Landsat-8 и Sentinel-1A был получен набор растровых изображений водной поверхности ВАП за различные моменты времени. Для визуального отображения зон затопления данные были преобразованы в формат KMZ и обработаны в Google Earth.

2. Технология обработки данных Landsat-8 и Sentinel-2

Отметим, что перед публикацией приведенные данные ДЗЗ уже были обработаны. Например, для Sentinel-2 обработка уровня Level-1C включает радиометрические и геометрические исправления, включая пространственную привязку в глобальной системе с высокой точностью, и выполнена по следующим шагам: 1) Ассоциация снимков: выбор predetermined снимков, пересекающих необходимые изображения. 2) Повторная выборка вычисления сетки: предоставление возможности соединения изображения геометрии к целевому (орто-исправленному) изображению геометрии. 3) Повторная выборка каждого диапазона в геометрии орто-изображения, интерполяция и вычисление коэффициентов отражения TOA. 4) Вычисление масок облаков и масок земли/воды. 5) Сжатие образов Level-1C с помощью алгоритма JPEG-2000 и географически закодированный заголовок GML.

Для Landsat-8 была разработана технология обработки снимков в GRASS GIS [9], включающая следующие этапы: 1) создание проекта, включающего базовый слой исследуемой территории в проекции WGS-84; 2) импорт снимков Landsat-8, полученных с сервера геодезической службы США; 3) радиометрическая калибровка снимков; 4) атмосферная коррекция; 5) создание маски воды (вычисление индекса WRI, получение растрового изображения с данными воды).

Для поиска объектов гидрологии было определено 6 различных водных индексов, с их помощью проводилось определение маски воды. Для автоматизации процесса обработки снимков был разработан модуль на языке Python для GRASS GIS [9], позволяющий задать каналы спутникового изображения (зеленый, красный, ближний ин-

фрактальный и др.) и получить на выходе изображение водного слоя, рассчитанного при помощи нижеприведенных индексов. Результаты обработки представлены в таблице 1.

Водный индекс (WRI). Индекс «Water Ratio Index» (WRI) используется для оценки содержания влаги в растительном покрове. Индекс WRI рассчитывается по формуле 1:

$$WRI = \frac{green + red}{near_{IR} + ShortWave_{IR}}. \quad (1)$$

На выходе получается бинарный растр водной поверхности [2].

Нормализованный разностный водный индекс (NDWI). Индекс, определяющий количество воды среди растительности, которое взаимодействует с поступающим солнечным излучением. Позволяет выявить вариации растительного покрова, связанные с условиями увлажнения. Показатель NDWI чувствителен к изменениям в жидкости воды содержания растительности. Он менее чувствителен к атмосферным воздействиям, чем Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Индекс NDWI вычисляется по формуле 2:

$$NDWI = \frac{IR_{factor} * near_{IR} - mir_{factor} * middle_{IR}}{IR_{factor} * near_{IR} + mir_{factor} * middle_{IR}}, \quad (2)$$

где IR_{factor} , mir_{factor} — значение задается пользователем вручную, по умолчанию 1; $near_{IR}$ — значение NIR соответствует band 8; $middle_{IR}$ — значение MIR соответствует band 11.

Второй нормализованный разностный водный индекс (NDWI2). Был разработан Макфитерсом (1996), необходим для того, чтобы обнаруживать поверхностные воды в окружающей среде заболоченной местности и допускается измерение степени поверхностной воды. Индекс NDWI2 рассчитывается по формуле 3:

$$NDWI2 = \frac{green_{factor} * green - IR_{factor} * near_{IR}}{green_{factor} * green + IR_{factor} * near_{IR}}, \quad (3)$$

где IR_{factor} , $green_{factor}$ — значение задается пользователем вручную, по умолчанию 1; $green$ — значение GREEN (значение зеленого спектра), соответствует band 3; $near_{IR}$ — значение NIR, соответствует band 8.

Модифицированный нормализованный разностный водный индекс (MNDWI). Алгоритм был разработан Сюем (2006) и может увеличить открытые водные сооружения, эффективно подавляя и даже удаляя шумовые эффекты с поверхности, а также шумы с почвы и растительности. Улучшение значений воды по полученному MNDWI-изображению приведет к более точному извлечению водных данных из застроенной земли, почвы и растительности, все отрицательные значения не будут учитываться, поэтому удалены. Индекс MNDWI рассчитывается по формуле 4:

$$MNDWI = \frac{green_{factor} * green - mir_{factor} * middle_{IR}}{green_{factor} * green + mir_{factor} * middle_{IR}}, \quad (4)$$

где mir_{factor} , $green_{factor}$ — значение задается пользователем вручную, по умолчанию 1; $green$ — значение GREEN (значение зеленого спектра), соответствует band 3; $middle_{IR}$ — значение MIR, соответствует band 11.

Нормализованный разностный индекс водоемов (NDPI). Алгоритм был разработан J.P. Lasaux (2006). Индекс NDPI позволяет не только определить небольшие во-

доемы и водные объекты (ниже 0,01 га), но также и дифференцировать растительность внутри водоемов от того, что их окружает. Индекс NDPI рассчитывается по формуле 5:

$$NDPI = \frac{green_{factor} * green - swir_{factor} * ShortWave_{IR}}{green_{factor} * green + swir_{factor} * ShortWave_{IR}}, \quad (5)$$

где $swir_{factor}$, $green_{factor}$ — значение задается пользователем вручную, по умолчанию 1; $green$ — значение GREEN (значение зеленого спектра), соответствует band 3; $ShortWave_{IR}$ — значение SWIR, соответствует band 12.

Нормализованный алгоритм — индекс мутности (NDTI). Алгоритм был разработан J.P. Lacaux (2006), допускаются значения мутности воды. Заболоченные места — одна из важных опасностей, которым может быть подвергнута окружающая среда. Стабильное управление экосистемой заболоченного места необходимо, поскольку это служит важной функцией, такой как хранение продовольствия, изучение качества воды и обеспечение благоприятных условий для различных разновидностей дикой природы. Более 75 % видов промысловой рыбы необходимы заболоченные места для нереста. Многие местные и перелетные птицы также используют прибрежные заболоченные места для размножения, обеспечения едой, здесь также обитают многие разновидности животных и растений. Заболоченные места — важный барьер против прибрежных, штормовых волн и наводнения. Индекс NDTI рассчитывается по формуле 6:

$$NDTI = \frac{red_{factor} * red - green_{factor} * green}{red_{factor} * red + green_{factor} * green}, \quad (6)$$

где red_{factor} , $green_{factor}$ — значение задается пользователем вручную, по умолчанию 1; $green$ — значение GREEN (значение зеленого спектра), соответствует band 3; red — значение RED (значение красного спектра), соответствует band 4.

Таблица 1

Определение зоны затопления с помощью водных индексов

Индекс	«Сухая поверхность», га (%)	«Водная поверхность», га (%)
NDWI	32 620,83 (32,26)	68 484,31 (67,74)
NDWI2	92 802,39 (91,79)	8 302,75 (8,21)
NDPI	88 772,95 (87,8)	12 332,19 (12,2)
NDTI	42 757,46 (42,92)	56 856,21 (57,08)
MNDWI	94 878,57 (93,84)	6 226,57 (6,16)
WRI	89 301,37 (88,33)	11 803,77 (11,67)

3. Сравнительная характеристика затопления поймы за различные годы

В таблице 2 представлены интегральные показатели площади затопления северной части ВАП, полученные при помощи снимков Landsat-8 (11 мая 2016 г.) и Sentinel-1A (13 мая 2015 г.). Для определения площадей по данным Landsat-8 использовался индекс WRI. Также для данных снимков представлена сравнительная характеристика площади ряда водоемов (табл. 3) ВАП.

Таблица 2

Интегральные показатели затопления ВАП

Дата	S затопления, га	Источник
17 апреля 2013 г.	2 685,60	Landsat-8
12 мая 2013 г.	7 644,64	
4 июня 2013 г.	4 773,44	
15 мая 2014 г.	4 582,59	
19 июня 2015 г.	1 169,57	
18 апреля 2016 г.	1 858,27	
11 мая 2016 г.	14 876,37	Sentinel-1A
13 мая 2015 г.	1 376,40	

Таблица 3

Водные объекты ВАП

Название водоема	Площадь водоема, м ²	
	2015 г.	2016 г.
Озеро Курнистый Садок	53 496,73	97 248,42
Озеро Кочковатое	5 105,43	225 281,02
Озеро Денежное	387 127,45	510 410,92
Лесное озеро	19 684,34	272 848,82
Озеро Садок	15 022,95	12 361,08
Озеро Самсоновское	99 094,35	247 719,98
Озеро Чубатое	99 597,31	132 000,28
Озеро Широкогорлое	131 175,53	486 267,17

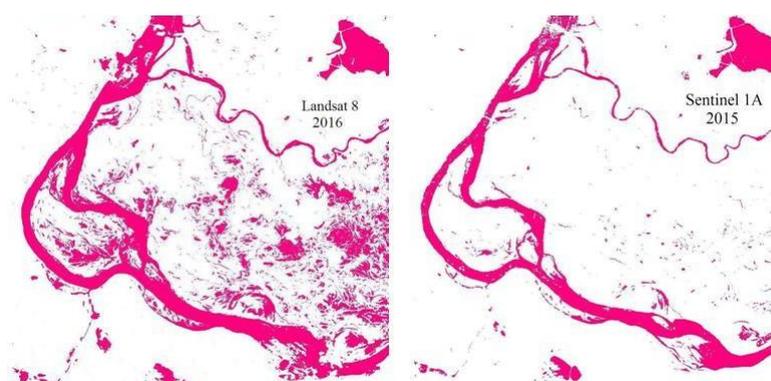


Рис. 2. Картина затопления северной части ВАП по данным Landsat-8 и Sentinel-1A

Заключение

Таким образом, данные космического ДЗЗ могут применяться для оценки паводковой ситуации территории ВАП [5; 6; 10]. На примере многоводного 2016 г. и маловодного 2015 г. дана оценка площадей затопления. Стоит заметить, что полученные космические данные не всегда позволили точно определить объект гидрографии, несмотря на достаточно высокое разрешение (от 10 м). По этой причине не удалось определить водотоки

ВАП как единые линейные объекты. Одна из возможных причин такого явления — густая прибрежная растительность и наклонная съемка исследуемой территории. Тем не менее пойменные разливы на большие площадные территории достаточно неплохо были определены как с помощью оптической, так и с помощью радарной космической съемки.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области (гранты № 15-45-02655 р_поволжье_a, 16-45-340152 р_a, 16-48-340147 р_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонникова, Е.О. Проблема прогноза и управления гидрологическим режимом на горной территории в период ливневого паводка на основе гидродинамических численных экспериментов / Е. О. Агафонникова, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов // Кибернетика и программирование. — 2016. — № 3. — С. 35–53.
2. Бизли, Б.М. Python. Подробный справочник / Б.М. Бизли. — СПб. ; М. : Символ, 2010. — 858 с.
3. Дробкин, Б. А. Европейская программа GMES и перспективная группировка спутников ДЗЗ Sentinel / Б.А. Дробкин // Геоматика. — 2011. — № 3. — С. 14–26.
4. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 2. Синтез системы управления / А. А. Воронин, М. В. Елисеева, С. С. Храпов, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков // Проблемы управления. — 2012. — № 6. — С. 19–25.
5. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности / А.А. Воронин, М.В. Елисеева, А.В. Писарев, А.В. Хоперсков, С.С. Храпов // Управление и высокие технологии. — 2012. — № 3 (19). — С. 54–62.
6. Модели и механизмы эколого-экономического управления слабоустойчивыми социо-природохозяйственными системами / А.А. Васильченко, А.А. Воронин, С.Е. Гребенюк, Ю. Е. Кругликова, Н.М. Кузьмин, Е.А. Петрова, А.В. Писарев, М.В. Писарева, Ю.Е. Радченко, Н.В. Решетникова, А.В. Хоперсков, С.С. Храпов, А.В. Шевандрин, О.С. Якушкина. — Волгоград : Консалт, 2015. — 488 с.
7. Проектирование механизмов управления гидрологическим режимом волго-ахтубинской поймы на основе геоинформационного и гидродинамического моделирования / А.А. Воронин, А.А. Васильченко, А.В. Писарев, С.С. Храпов, Ю.Е. Радченко // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2016. — № 1 (32). — С. 24–37.
8. Cang, L. Analysis of Sentinel-1 SAR data for mapping standing water in Twente region / L. Cang. — Enschede : European space agency, 2016. — 47 p.
9. Neteler, M. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Third edition / M. Neteler, H. Mitasova. — N. Y. : Springer, 2008. — 420 p.
10. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage / S. Khrapov, A. Pisarev, I. Kobelev, A. Zhumaliev, E. Agafonnikova, A. Losev, A. Khoperskov // Advances in Mechanical Engineering. — 2013. — Article ID: 787016. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/787016>.

REFERENCES

1. Agafonnikova E.O., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Problema prognoza i upravleniya gidrologicheskim rezhimom na gornoy territorii v period livneвого pавodka na osnove

gidrodinamicheskikh chislennykh eksperimentov [The Problem of Forecasting and Controlling the Hydrological Regime in the Mountainous Area in the Period Flash Floods on the Basis of Hydrodynamical Numerical]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2016, no. 3, pp. 35-53.

2. Bizli B.M. *Python. Podrobnyy spravochnik* [Python. Essential Reference]. Saint Petersburg, Moscow, Simvol Publ., 2010. 858 p.

3. Drobkin B.A. Evropeyskaya programma GMES i perspektivnaya gruppirovka sputnikov DZZ Sentinel [European GMES Program and Perspective Group of DZZ Sentinel Satellites]. *Geomatika* [Geomatics], 2011, no. 3, pp. 14-26.

4. Voronin A.A., Eliseeva M.V., Khrapov S.S., Pisarev A.V., Khoperskov A.V. Zadacha upravleniya gidrologicheskim rezhimom v ekologo-ekonomicheskoy sisteme «Volzhskaya GES – Volgo-Akhtubinskaya poyma». Ch. 2. Sintez sistemy upravleniya [Task Management of the Hydrological Mode in an Ecological and Economic System «Volga Hydroelectric Power Station – Volga-Akhtuba» Flood Plain. P. 2. Synthesis of a Management System]. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2012, no. 6, pp. 19-25.

5. Voronin A.A., Eliseeva M.V., Pisarev A.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Imitatsionnye modeli dinamiki poverkhnostnykh vod s ispolzovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya: vliyanie relyefa mestnosti [Simulation Models of Surface Water Dynamics Using Remote Sensing Data: Effect of Terrain]. *Upravlenie i vysokie tekhnologii* [Control and high technology], 2012, no. 3 (19), pp. 54-62.

6. Vasilchenko A.A., Voronin A.A., Grebenyuk S.E., Kruglikova Yu.E., Kuzmin N.M., Petrova E.A., Pisarev A.V., Pisareva M.V., Radchenko Yu.E., Reshetnikova N.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Shevandrin A.V., Yakushkina O.S. *Modeli i mekhanizmy ekologo-ekonomicheskogo upravleniya slaboustoychivymi sotsioprirodokhozyaystvennymi sistemami* [Models and Mechanisms of Ecological and Economic Management of Weak Steady Socially Natural Economic Systems]. Volgograd, Konsalt Publ., 2015. 488 p.

7. Voronin A.A., Vasilchenko A.A., Pisarev A.V., Khrapov S.S., Radchenko Yu.E. Proektirovanie mekhanizmov upravleniya gidrologicheskim rezhimom volgo-akhtubinskoy poymy na osnove geoinformatsionnogo i gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Designing Mechanisms of the Hydrological Regime Management of the Volga-Akhtuba Floodplain Based on Geoinformation and Hydrodynamic Modeling]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2016, no. 1 (32), pp. 24-37.

8. Cang L. *Analysis of Sentinel-1 SAR data for mapping standing water in Twente region*. Enschede, European space agency, 2016. 47 p.

9. Neteler M., Mitasova H. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Third edition*. N. Y., Springer, 2008. 420 p.

10. Khrapov S., Pisarev A., Kobelev I., Zhumaliev A., Agafonnikova E., Losev A., Khoperskov A. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, article ID: 787016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/787016>.

THE FLOODING DYNAMICS OF THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN DURING SPRING FLOOD USING SPACE MONITORING

Alena Nikolaevna Presnyakova

Student, Institute of Mathematics and Information Technologies,
Volgograd State University
a.n.presnyakova@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Andrey Vladimirovich Pisarev

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
pisarev@volsu.ru, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Sergey Sergeevich Khrapov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
khrapov@volsu.ru, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. Volga-Akhtuba floodplain is exposed to annual flooding. Depending on several factors (hydrological regime, hydrographic network, the weather situation and socio-economic activities) flood events may lead to various consequences both positive and negative. Monitoring is necessary to eliminate unwanted options for the growth of flood areas and to predict potentially dangerous situations. One of the methods of studying phenomena in the Volga-Akhtuba floodplain is a space monitoring. Science programs such as Landsat and Sentinel allow to receive spatial data with a resolution of 10–30 meters with intervals 3–10 days. Thus, it becomes possible to track the dynamics of flooding and water distribution for the assessment of flood zones.

Satellite images were taken of different time intervals corresponding to the period of 2013–2016 years floods. The technology of remote sensing data decryption based on the algorithms of search quality hydrographic objects was developed. The software module for multi-layer processing of satellite data in GRASS GIS system was developed. The integral indicators of flooding of the Volga-Akhtuba floodplain for several years were analyzed. Thus, research of flood events with floodplain systems using modern satellite monitoring equipment is promising.

Key words: GIS, flood detection, ERS, GRASS GIS, Landsat, Sentinel.