

УДК 528.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.006)

## Прогнозирование зон затопления территории поймы реки Амга с использованием геоинформационных технологий

А.С. Нестерева<sup>1</sup>, Е.Н. Жданова<sup>2</sup>, А.А. Минина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН), Республика Саха, Якутск, Российская Федерация

<sup>2,3</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Резюме:** Чрезвычайные ситуации природного характера оказывают значительное негативное влияние на жизнь и здоровье людей, состояние окружающей среды и материально-технические объекты. В связи со значительной протяженностью территории Российской Федерации, разнообразием климатических и ландшафтно-географических характеристик, прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера приобретает особую актуальность. Целью работы является прогнозирование границ территории зон затопления поймы реки Амга во время весеннего половодья с помощью геоинформационных технологий. Объектом исследования выступает река Амга в среднем течении. Предметом исследования являются подтопляемые участки реки Амга. Для определения зон затоплений в работе применяются следующие методы исследований космических снимков при наличии густых слоев облаков: математический (индексы растительности), картографический (растровые модели) и гидрологический анализ на основе цифровой модели рельефа (геометрический подход). Разработаны методологии для определения зон затоплений с помощью мультиспектральных и радарных снимков, а также цифровой модели рельефа. Анализ полученных результатов позволяет выявить границы территорий, пострадавших в результате затопления и дать прогноз по участкам, находящимся в зонах риска.

**Ключевые слова:** снимки с густым слоем облаков, WDV, наводнение, зона затопления, геоинформационные системы, цифровая модель рельефа, радарный снимок, мультиспектральный снимок, Амга.

**Для цитирования:** Нестерева А.С., Жданова Е.Н., Минина А.А. Прогнозирование затопляемых участков реки Амга с использованием геоинформационной технологии. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=959> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.006

## Flooding zones prediction of the Amga River floodplain using geoinformation technologies

A.S. Nestereva<sup>1</sup>, E.N. Zhdanova<sup>2</sup>, A.A. Minina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2,3</sup>Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** Natural emergencies have a significant impact on the surrounding areas and real-world objects. Due to the large scale of the territory, climatic parameters, landscape, and geographical characteristics, in Russia, the most dangerous emergencies are natural. For the Northern regions of the country, one of these situations is flooding. In the northern territories, severe climatic conditions prevail, and the average temperature growth rate is twice as high as in other geographic areas. It can lead to the retreat of permafrost, which in turn entails dangerous hydrometeorological phenomena. The work's purpose is to

forecast the flood areas of the Amga River during the spring flood using geoinformation technology. The Amga River in the middle course, which was flooded in 2018, is the object of the study. The subject of the study is the prediction of flooded zones of the Amga River based on satellite observations. Satellite images with a thick layer of clouds were used to determine the flooded zones. A mathematical method (based on the vegetation index), a geoinformation method (raster), and a geometric approach (DEM) were applied. Methodologies have been developed for determining flooded zones using multispectral images, radar images, and a digital terrain model. By comparing the results obtained, you can define which zones are affected and are at risk in the future.

**Keywords:** images with a thick layer of clouds, WDVI, flood, flood zone, geoinformation systems, digital terrain model, radar image, multispectral image, Amga River

**For citation:** Nestereva A.S., Zhdanova E.N., Minina A.A. Prediction of flooded area of the Amga river with using geoinformation technology. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=959> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.006 (In Russ).

## Введение

Все чаще человечество сталкивается со множеством различных природных явлений. В зависимости от сезона и территории ежедневно происходят чрезвычайные ситуации (ЧС) природного характера – землетрясения, ураганы, тайфуны, цунами, пожары, извержения вулканов, наводнения. Такие ЧС являются неизбежными процессами, происходящими на Земле. Одним из наиболее опасных природных явлений, с которыми сталкивается человечество, является наводнение [1], в частности, представляющее существенную угрозу для северных регионов страны, в связи с их экстремальными природными условиями, а также превышением темпов роста температуры воздуха и поверхности почвы более чем в два раза по сравнению со средними значениями. Также повышается риск таяния вечной мерзлоты, что влечет за собой возникновение опасных гидрологических явлений.

Наводнение – значительное затопление водой местности, населенных пунктов, объектов инфраструктуры, земель сельскохозяйственного назначения, которое наносит значительный ущерб экономике, социальной сфере, природной среде. Причинами наводнения могут выступать формирование половодий и паводков, продолжительные дожди и ливни, снеготаяние, хозяйственная деятельность человека в речных бассейнах и руслах и др. Масштабы и последствия наводнений зависят от их продолжительности, рельефа местности, ландшафта, степени застройки населенного пункта и плотности населения, времени года, параметров окружающей среды, скорости движения и подъема воды, состояния гидротехнических сооружений и т. д. В последние столетия частота, размеры и наносимый урон значительно возросли [2]. В некоторые сезоны наводнения случаются с периодичностью в 2-3 дня, что может привести к проблемам при эксплуатации и строительстве на осваиваемых территориях. Это обуславливает актуальность поставленной проблемы и подчеркивает приоритеты обнаружения, анализа, оценки последствий и прогнозирования наводнений в местах, подверженных данному виду ЧС.

В исследовании при определении зон затопления применяется ряд спектральных индексов, которые характеризуют соотношение отражений в разных каналах спутниковой съемки, что является более информативным показателем, чем анализ снимков в отдельных диапазонах спектра. В период высокой облачности для определения анализируемых объектов на мультиспектральном снимке необходимо использовать индексы, чувствительные к атмосферным воздействиям, например,

взвешенный разностный индекс (WDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI), индекс различий увлажненности (NDMI) и т. д. [3], либо воспользоваться радарным снимком.

Так, в работе М. Ю. Катаева [4] применялись индексы NDMI и NDWI при выделении русла рек Томь и Обь. Подобранные спектральные индексы позволяют дифференцировать пиксели водных объектов от пикселей растительного покрова. В работе А. Г. Терехова [5] посредством индекса WDVI был составлен прогноз урожайности в районе Казахстана. Одним из примеров применения радарного снимка в выделении водных объектов можно привести работу О. П. Архипкина [6]. В этом исследовании выделялись зоны затопления р. Ишим, Нура и Иртыш по снимкам с нулевой облачностью за апрель. Хотя приведенные выше способы обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ) эффективно применяются при решении поставленных задач, однако в настоящий момент в исследованных работах не отражена возможность использования этих методов в выделении водных объектов в период высокой облачности. В приведенном исследовании впервые представлены возможности оценки зоны затопления (на примере с. Амга в районе Восточной Сибири) по спутниковым снимкам с высокой облачностью с применением вышеуказанного индекса WDVI и радарного снимка.

Районом исследования является долина реки Амга в ее среднем течении, протекающая в Центральной Якутии (Республика Саха (Якутия)), которая хорошо развита и состоит из целого комплекса надпойменных террас. Растительный покров на данном участке представлен лугово-степным типом. Территория исследуемого района расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых составляет 300-350 м. Климат этого региона резко континентальный с коротким жарким летом и продолжительной холодной зимой [7].

### Материалы и методы

Анализ изученной литературы позволяет говорить, что при решении задач прогнозирования необходимо учитывать такие особенности рассматриваемой территории как протяженность, рельеф, климатические условия, количество и состояние техногенных объектов и др.

Для этого целесообразно применение геоинформационных систем (ГИС).

Актуальность использования таких систем обоснована активным применением ГИС-технологии в изучении чрезвычайных ситуаций природного характера, так как они помогают оперативному мониторингу для прогнозирования и анализа последствий наводнений. Ее использование для определения возможных рисков зон затоплений дает возможность сформулировать рекомендации по степени опасности строительства жилых домов на затопленных территориях [8].

Применение геоинформационных технологий позволяет фиксировать и оценивать изменения объекта исследования в перспективе. В рамках исследования был разработан проект «Определение зон затоплений на реке Амга во время весеннего половодья», который поможет в исследовании и прогнозировании состояния других северных рек [9].

Работа основана на анализе мультиспектральных снимков в период высокой облачности, а также исследовании радарных снимков, которые могут быть сделаны при любых погодных условиях и разработке цифровых моделей рельефа (ЦМР) [10].

Как известно, спутники делают снимки с определенным промежутком времени, что, в частности, затрудняет проведение ГИС-анализа при определенных датах, так как могут отсутствовать снимки во время наводнения. Выходом из данной ситуации является

использование радарных снимков или же снимков, которые покрыты густым слоем облаков. Однако, стоит учитывать, что обработка таких снимков затрудняется наличием сбойных пикселей. Тем не менее, использование спектрального индекса дает возможность получения корректных данных из таких снимков.

Для определения наиболее подходящего спектрального индекса и автоматизации процесса были созданы модели для различных характеристик (в статье представлены только результаты индекса WDWI).

При этом следует учитывать пороги чувствительности к разреженности растительности, например, не следует применять индексы, если растительный покров меньше:

- NDVI = 30%;
- WDWI = 15%.

Также для выбора индекса важен показатель чувствительности к изменению атмосферы, что достигается уменьшением динамического диапазона, и угол наклона почвенной линии. Расчет индексов представлен формулами (1), (2) и (3):

$$WDVI = (Band_{NIR} - \rho * Band_{RED}), \quad (1)$$

где  $\rho$  – угол наклона почвенной линии,  $Band_{NIR}$  – ближний инфракрасный канал,  $Band_{RED}$  – красный канал.

$$NDVI = \frac{(Band_{NIR} - Band_{RED})}{(Band_{NIR} + Band_{RED})}, \quad (2)$$

$$NDMI = \frac{(Band_{NIR} - Band_{SWIR1})}{(Band_{NIR} + Band_{SWIR1})}, \quad (3)$$

где  $Band_{SWIR1}$  – это средний инфракрасный канал.

Вегетационный индекс (ВИ) WDWI в ближнем инфракрасном диапазоне увеличивает сигнал, полученный от растительности, и при этом уменьшает яркость почвы. Поэтому, несмотря на густой слой облаков на снимке, можно определить площадь распространения наводнения с помощью данного показателя.

На Рисунке 1 представлен оригинальный снимок спутника Sentinel-2 и результат применения к данному снимку WDWI.

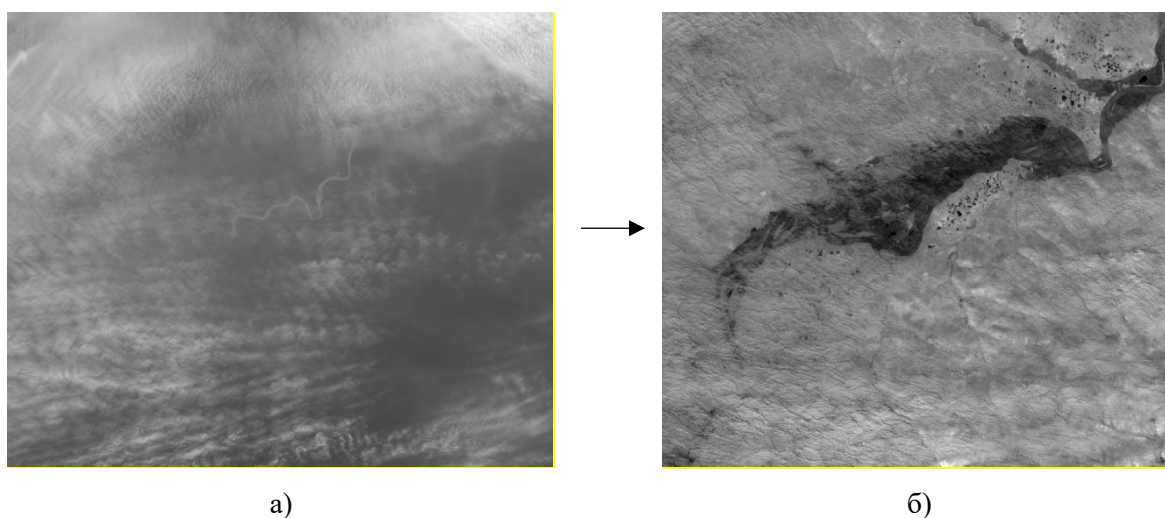


Рисунок 1 – Территория Амгинского района, село Амга 09.05.2018 г. (а) и результат применения ВИ WDWI (б)

Figure 1 – The territory of the Amga district, the village of Amga 09.05.2018 (a) and the result of applying the WDWI VI (b)

На Рисунке 2 приведена методология определения зон затопления на мультиспектральных снимках с густым слоем облаков, которая демонстрирует алгоритм обработки данных.

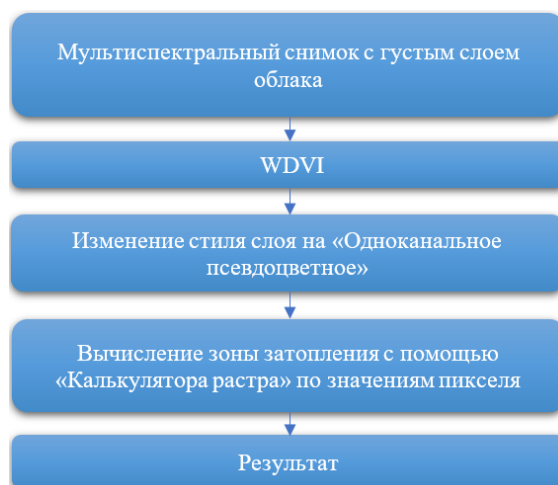


Рисунок 2 – Методология определения зон затопления для мультиспектральных снимков  
Figure 2 – Methodology for determining flood zones for multispectral images

При решении данной задачи в исследуемом диапазоне времени могут отсутствовать мультиспектральные снимки, выходом из этой ситуации является использование радарных. Огромное преимущество радарных снимков – прозрачность в облачной атмосфере. На Рисунке 3 представлена методология определения зон затоплений с помощью радарных снимков.

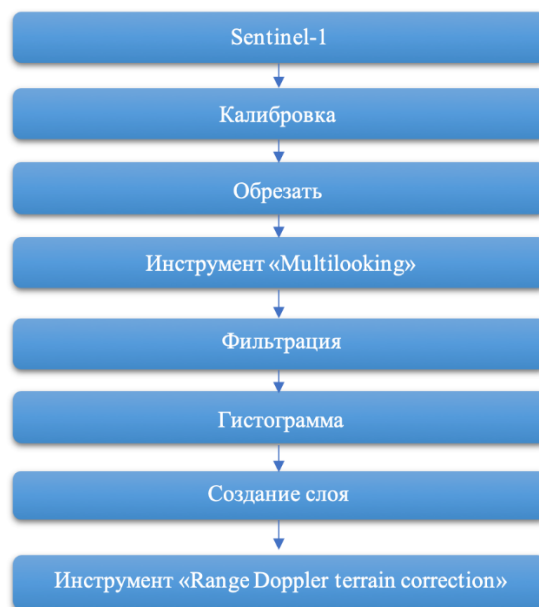


Рисунок 3 – Методология определения зон затопления для радарных снимков  
Figure 3 – Methodology for determining flood zones for radar images

На Рисунке 4 отображена методология построения ЦМР для определения высот уровня затопления и отображения трехмерной модели рельефа местности.





Рисунок 4 – Методология определения зон затопления для ЦМР  
 Figure 4 – Methodology for determining flood zones for DTM

### Обсуждение

На Рисунке 5 представлено сравнение цифровой модели рельефа и снимка Sentinel-2, которое проводилось в программе QGIS. С помощью ЦМР отдельным слоем маски выделена территория («Smooth surface»), которая находится в зоне риска затопления и представлена на карте. Также приведен результат, отображающий площадь наводнения, полученный с помощью мультиспектрального снимка с густым слоем облаков, на карте слой обозначен как «Flood zone».

Для устранения расхождения полученных данных с реальным изображением и нивелировки полученных погрешностей используется сопоставление ЦМР и изображения, полученного с помощью мультиспектрального анализа, на Рисунке 5 данные участки выделены красным контуром.



Рисунок 5 – Сравнение результатов ЦМР и Sentinel-2 по состоянию на 9 мая 2018 г.  
 Figure 5 – Comparison of DEM and Sentinel-2 results as of May 9, 2018

На представленной ниже карте красным контуром выделены участки, которые были затоплены во время половодья (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Затопленные зоны на 9 мая 2018 г.  
Figure 6 – Flooded areas as of May 9, 2018

На Рисунке 7 приведен результат сравнения ЦМР с радарным снимком на конец наводнения. 13 мая ситуация с наводнением улучшилась, поэтому на карте в основном отображается только ровная поверхность «Smooth surface».



Рисунок 7 – Результат сравнения ЦМР с результатом радарного снимка  
Figure 7 – The result of comparing the DEM with the result of the radar image

### Результаты

Для наглядного представления затопленных участков было выполнено трехмерное моделирование по состоянию на 9 и 12 мая 2018 г., которое представлено на Рисунках 8 и 9, соответственно.



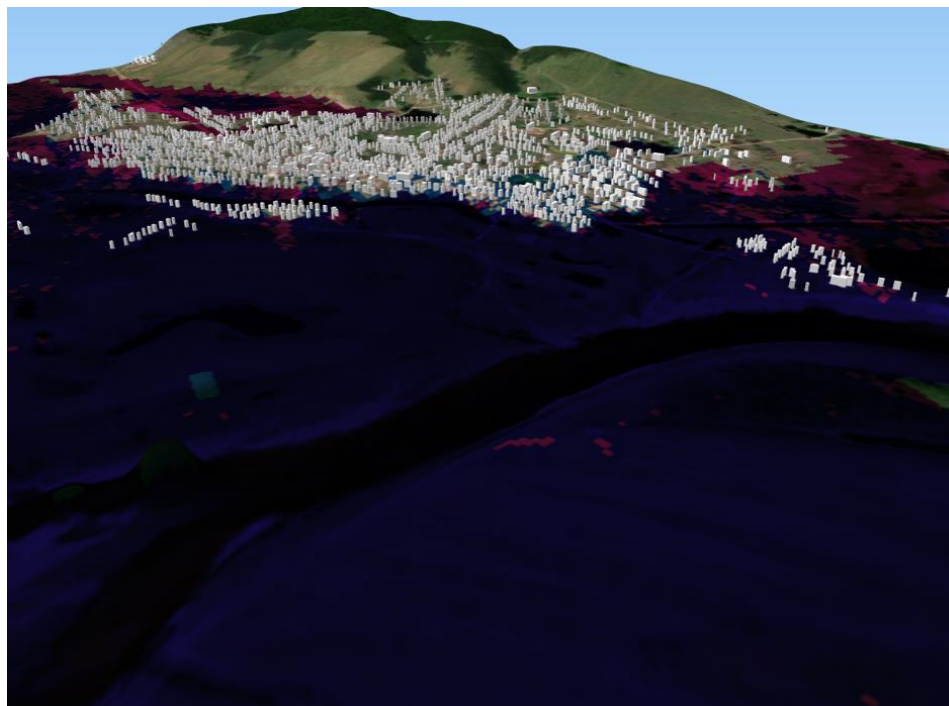


Рисунок 8 – Результат сравнения ЦМР и Sentinel-2 по состоянию на 9 мая 2018 г.  
Figure 8 – Comparison of DEM and Sentinel-2 as of May 9, 2018

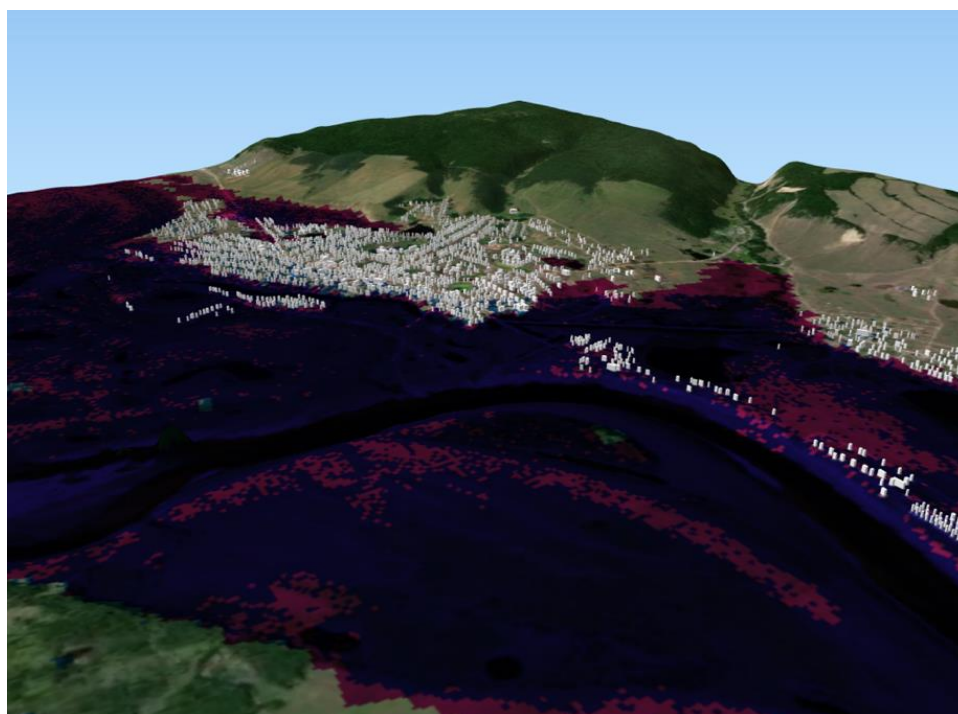


Рисунок 9 – Результат сравнения ЦМР и Sentinel-2 по состоянию на 12 мая 2018 г.  
Figure 9 – Comparison of DEM and Sentinel-2 as of May 12, 2018.

На полученных трехмерных картах наглядно видно, как изменился разлив реки Амга, стоит отметить, что данная зона имеет риск затопления. Увеличение масштаба карты позволяет дать более точные границы района – улицы Крестьянская и Байкалова (Рисунок 10). Также был затоплен район промкомбината, так как он находится в непосредственной близости от реки Амга.



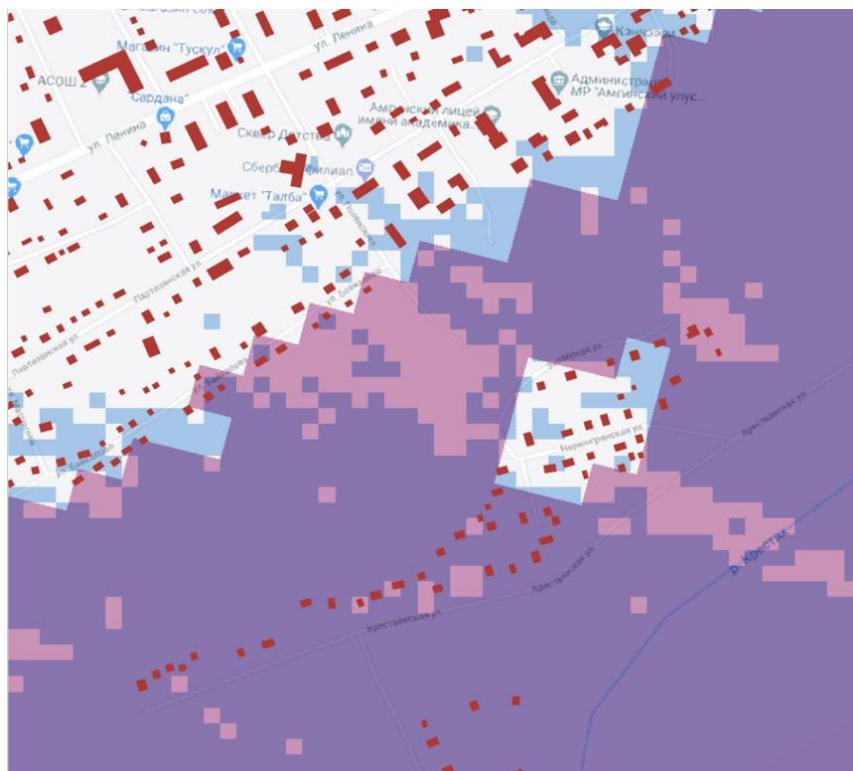


Рисунок 10 – Карта затопленных улиц, село Амга  
Figure 10 – Map of flooded streets, Amga village

### Заключение

В настоящей работе приведено исследование территории наводнения в районе с. Амга с применением вегетационного индекса WdVI в период высокой облачности. Были выявлены территории, находящиеся в зоне риска, путем сравнения изображений, полученных с использованием индекса WdVI, и цифровой моделью рельефа. Также был использован радарный снимок, который применялся для выделения зон затоплений.

Полученные результаты могут быть использованы при территориальном планировании и развитии населенного пункта. Приведенные подходы (обработка снимков с помощью индекса WdVI и радарных снимков) также могут быть использованы в будущем при исследовании природных процессов других регионов в период высокой облачности.

По результатам определения зон затоплений следует отметить следующее:

– при использовании мультиспектральных снимков появляются неточности в определении зон затоплений ввиду высокой облачности снимков за исследуемый период. При использовании таких снимков стоит учитывать наличие погрешностей в полученных результатах;

– в работе не приведен сравнительный анализ мультиспектрального снимка с радарным ввиду отсутствия последнего в начале наводнения. Однако, применение радарного снимка (в случае его наличия) при анализе зоны затопления может повысить репрезентативность исследования.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Истомина М.Н., Кочарян А.Г., Лебедева И.П., Никитская К.Е. Экологические последствия наводнений. *Инженерная экология*. 2004;4:3-21.

2. Овчинникова И.С., Серяков П.С., Кобзева Н.А. К проблеме воздействия наводнений (на примере зарубежных публикаций). *Молодой ученый*. 2015;11:550-552.
3. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационного индекса. *Геоматика*. 2009. Доступно по: <https://sovzond.ru> (дата обращения: 10.03.2020)
4. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям. *Доклады ТУСУРа*. 2017;4(20):105-108.
5. Терехов А.Г., Кауазов А.М. Подспутниковый MODIS-ориентированный анализ информативности вегетационных индексов в задаче описания состояния яровой пшеницы Северного Казахстана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007;2(4):352-357.
6. Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н. Использование поляриметрических радарных данных при космическом мониторинге паводков и наводнений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017;14(2):175-184.
7. Саввинов Г.Н. Особенности гидротермического режима мерзлотных черноземов и лугово-черноземных почв при осенних влагозарядковых поливах (на примере долины реки Амга). *Автореферат дис. ... кан. биол. наук. Академия наук Республики Саха (Якутия) институт прикладной экологии Севера*. 1997:21.
8. Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных. *Труды СПИИРАН*. 2015;4(41):5-33. Доступно по: [www.proceedings.spiras.nw.ru](http://www.proceedings.spiras.nw.ru)
9. Tananaev N.I., Efremova V.A., Gavrilyeva T.N., Parfenova O.T. Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia. *Hydrology Research*. 2020;52(1):125-141. Доступно по: <https://iwaponline.com>. DOI: 10.2166/nh.2020.124
10. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Сорохтин Н.О., Козлов Н.Е. Цифровые модели рельефа дна и некоторые возможности их морфометрического анализа. *Вестник МГТУ*. 2015;18(2):287-294.

## REFERENCES

1. Istomina M.N., Kocharyan A.G., Lebedeva I. P., Nikitskaya K.E. Ecological consequences of floods. *Inzhenernaya ekologiya*. 2004;4:3-21. (In Russ)
2. Ovchinnikova I.S., Seryakov P.S., Kobzeva N.A. On the problem of flooded impact (on the example of foreign publications). *Molodoy ucheniy*. 2015;11:550-552. (In Russ)
3. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation index. *Geomatics*. Available at: <https://sovzond.ru> (In Russ), (accessed 10.03.2020)
4. Kataev M.Yu., Bekеров A.A. Method of detecting water objects by multispectral satellite measurements. *Doklady TUSURa*. 2017;4(20):105-108. (In Russ)
5. Terekhov A.G., Kauazov A.M. Subsatellite MODIS-oriented analysis of the informativeness of vegetation indices in the problem of describing the state of spring wheat in Northern Kazakhstan. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2007;2(4):352-357. (In Russ)
6. Arkhipkin O.P., Sagatdinova G.N. Use of polarimetric radar data in space monitoring of floods and floods. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017;14(2):175-184. (In Russ)
7. Savvinov G.N. Features of the hydrothermal regime of permafrost chernozems and meadow-chernozem soils during autumn water-charging irrigation (on the example of the

- Amga River valley). *Avtoreferat dis. ... kan. biol. nauk. Akademiya nauk Respubliki Sakha (Yakutiya) institut prikladnoy ekologii Severa*. 1997:21. (In Russ)
8. Alabyan A. M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potryasayev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R. M. Rapid flood forecasting based on comprehensive proactive modeling and integration of heterogeneous data. *Trudy SPIIRAN*. 2015;4(41):5-33. Available at: [www.proceedings.spiras.nw.ru](http://www.proceedings.spiras.nw.ru) (In Russ)
  9. Tananaev N.I., Efremova V.A., Gavrilyeva T.N., Parfenova O.T. Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia. *Hydrology Research*. 2020;52(1):125-141. Available at: <https://iwaponline.com>. DOI: 10.2166/nh.2020.124
  10. Nikiforov S.L., Koshel S.M., Sorokhtin N.O., Kozlov N.E. Digital models of the bottom relief and some possibilities of their morphometric analysis. *Vestnik MGTU*. 2015;18(2):287-294. (In Russ)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Нестерева Алена Семеновна**, инженер лаборатории криогенных ландшафтов, ИМЗ СО РАН, Якутск, Российская Федерация.  
*e-mail*: [xo.nestalena@gmail.com](mailto:xo.nestalena@gmail.com)

**Alena S. Nestereva** engineer of the Laboratory of Cryogenic Landscapes, Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

**Жданова Екатерина Николаевна**, к.т.н., ассистент, кафедра информационно-измерительных систем и технологий, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Российская Федерация.  
*e-mail*: [enzhdanova@etu.ru](mailto:enzhdanova@etu.ru)

**Ekaterina N. Zhdanova**, Phd In Engineering, Assistant, Department «Information measuring system and technologies», Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

**Минина Анастасия Андреевна**, к.т.н., доцент, доцент, кафедра информационно-измерительных систем и технологий, проректор по международной деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Российская Федерация.  
*e-mail*: [aaminina@etu.ru](mailto:aaminina@etu.ru)

**Anastasia A. Minina**, Phd In Engineering, Associate Professor, Department «Information measuring system and technologies», Vice-Rector for International Affairs Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 26.03.2021; одобрена после рецензирования 16.10.2021; принята к публикации 21.10.2021.*

*The article was submitted 26.03.2021; approved after reviewing 16.10.2021; accepted for publication 21.10.2021.*