



УДК 556+502+528.88

## МОНИТОРИНГ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗМЫВА БЕРЕГА Р. ВЯТКИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА «НУРГУШ» И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**Рогожникова Екатерина Владимировна**, заместитель директора по научной работе  
ФГБУ «Государственный заповедник «Нургуш»  
610002, г. Киров, ул. Ленина, 129а

**Рутман Вячеслав Владимирович**, младший научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»  
610000, г. Киров, ул. Московская, 36

*Аннотация. Описаны результаты девятилетних наблюдений за интенсивностью размыва береговой линии р. Вятки в пределах территории заповедника «Нургуш». Результаты полевых измерений демонстрируют изменение территории заповедника путем смыва берега на одних участках и увеличения песчаных наносов на других участках. Для того чтобы наглядно проследить изменения берега реки, был применен спектральный индекс NDAI, позволяющий установить границу земля–вода.*

*Ключевые слова: заповедник «Нургуш», дистанционное зондирование Земли, индекс NDAI, река Вятка, мониторинг, береговая линия, русловые процессы, эрозия берегов.*

Государственный природный заповедник «Нургуш» образован в 1994 г. в Котельничском районе Кировской области. В 2010 г. территория ООПТ была расширена за счет присоединения участка Тулашор в Нагорском районе Кировской области. В настоящее время площадь заповедника составляет 23 449,7 га. Участок Нургуш расположен в правобережном пойменном расширении долины р. Вятки, которая является главной водной артерией региона и заповедника «Нургуш», а также его естественной северной и восточной границей [1].

Многолетние наблюдения за различными параметрами природной среды – это обязательная часть научной работы в заповеднике «Нургуш». Одним из таких исследований является мониторинг изменения береговой линии реки Вятки в пределах заповедника, который ведется с 2008 г.

Изменение территории заповедника «Нургуш за счет смещения береговой линии наблюдалось в течение всего времени его существования. Неоднократно сотрудникам приходилось перемещать пограничные информационные знаки дальше от берега ввиду его обрушения и, как следствие, критического приближения к знаку. Обваливание берегов и сопутствующее этому падение деревьев вызваны, главным образом, разрушительным воздействием весеннего паводка. Величина смыва берега на отдельных участках достигала почти 8 м за год. Река Вятка в целом характеризуется интенсивными

процессами меандрирования. Так, по данным Адамович Т. А. [2], полученным в результате дешифрования космических снимков, в Кирово-Чепецком районе правый берег излучины р. Вятки за 10 лет сместился на 80–100 м. Береговая линия смещается в результате размыва высокого коренного берега, при этом на противоположном берегу происходит отложение аккумулятивного материала [2].

ЦЕЛЬ данной работы – анализ накопленных с 2013 г. данных по изменению береговой линии р. Вятки, а также их интерпретация с помощью космических снимков и спектральных индексов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. Для измерения интенсивности размыва берега р. Вятки на территории заповедника установлены реперы (контрольные точки), от которых ежегодно измеряется расстояние до кромки берега (рис. 1).

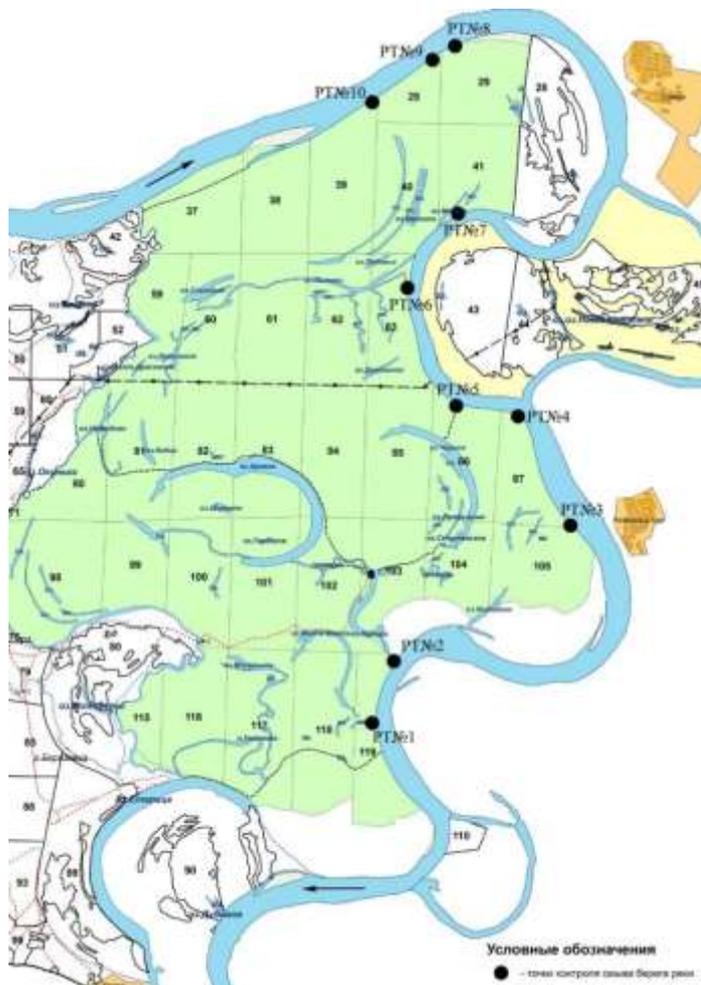


Рис. 1. Карта-схема расположения реперных точек на территории заповедника «Нургуи».

В качестве реперов выбраны деревья в глубине леса. Деревья помечены краской, а их местоположение зафиксировано с помощью навигатора. Строительной рулеткой измеряется расстояние от основания дерева до кромки берега по заданному азимуту.

Анализ данных и расчеты произведены в программе MSExcel. Для расчета спектральных индексов использовали космические снимки со спутников Sentinel 2 (А и В). Было проанализировано 11 снимков с 2015 по 2020 г. с июля по сентябрь, период после весеннего половодья. Расчет NDAI, построение индексных изображений и другая работа с геоданными осуществлялись в программе QGIS 3.20.

NDAI рассчитывали по формуле (1):

$$NDAI = \frac{I_G + 2I_{NIR} - I_B - I_R}{I_G + 2I_{NIR} + I_B + I_R} + 0,5 \quad (1)$$

где  $I_B$ ,  $I_G$ ,  $I_R$ ,  $I_{NIR}$  – яркость излучения водного объекта в синем (канал B2), зелёном (B3), красном (B4) и ближнем инфракрасном (B8) диапазонах соответственно.

**РЕЗУЛЬТАТЫ.** На территории заповедника «Нургуш», согласно измерениям 2013–2021 гг., наиболее интенсивно размыв берега происходит в контрольных точках 1, 2, 6 и 7 (рис. 1, 2, табл.). Величина смыва при этом составила 16,7 м, 16,2 м, 10,3 м и 23 м соответственно. Берег у этих реперов смещается в сторону леса в среднем на 1,72–2,88 м/год (табл.). Сходство указанных реперов в высокой интенсивности размыва берега обусловлено схожим их расположением относительно речного русла (рис. 1). Обе пары реперов (1 и 2, 6 и 7) находятся в центральной части (или близ нее) изгиба русла на внешнем (вогнутом) берегу, где водный поток с переносимым материалом оказывает сильнейшее воздействие, так как поверхностные струи потока с наибольшей скоростью смещаются к внешнему берегу излучины [3]. Кроме того, на изгибе русла, согласно Н. И. Маккавееву, увеличивается живая сила потока вследствие роста неравномерности поля скоростей [4, 5]. Минимальный смыв отмечается в точке №3 – всего 1,1 м за рассматриваемый период (со средней скоростью 0,14 м/год). В остальных реперных точках суммарный размыв берега составляет от 4,4 до 5,95 м, а средняя скорость «движения» береговой линии изменяется от 0,55 до 0,74 м/год (рис. 2, табл 1.).

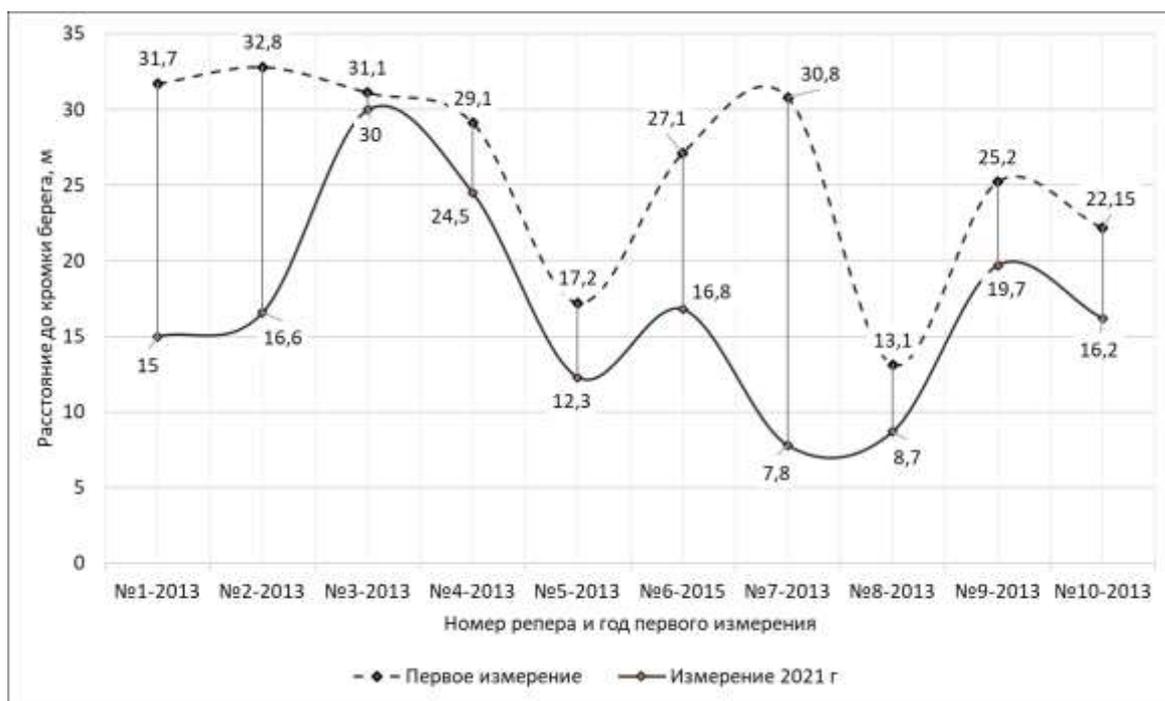


Рис. 2. Величина смыва берега р. Вятки в контрольных точках по результатам измерений в 2013–2021 гг.

Таблица 1

**Средняя скорость смещения берега р. Вятки в реперных точках на территории заповедника «Нургуш»**

№ репера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Средняя скорость, м/год	2,09	2,03	0,14	0,58	0,61	1,72	2,88	0,55	0,69	0,74

Ежегодно на всех реперах разрушается в среднем 11,24 м береговой линии. Однако интенсивность смещения берега в установленных реперах неодинакова из года в год (рис.3). Так, не отмечено разрушение берега в 2021 г. у 5 из 10 реперов – 1, 3, 4, 5, 6. Репер №3 выделяется среди всех минимальной эрозией берега (рис. 2). С 2017 г. здесь не регистрируется изменение расстояния от репера до кромки берега, и оно составляет 30 м. Судя по всему, уже в течение нескольких лет в этом районе преобладает аккумуляция материала, и к 2021 г. у берега сформировался пляж.

В 2016 г. общая величина размыва была максимальной и составила 22,03 м, из них 7,9 м – в контрольной точке №6 (рис. 3). Возможно, одним из главных факторов столь значительного разрушения берега стал высокий уровень воды во время весеннего половодья – 742 см. Продолжительность затопления поймы составила 38 дней [6]. За время существования заповедника это лишь третий случай подъема воды выше 7 метров (в 2002 г. – 735 см, в 1995 – 710 см). Репер №6, выделившийся максимальной величиной разрушения берега в 2016 г., именно благодаря этому находится в одном ряду с реперами 1, 2 и 7, имея среднюю скорость смещения берега 1,72 м/год. В 2015 г. репер был перенесен дальше от берега из-за сильного его разрушения (годом раньше указывалось расстояние до кромки берега 9 м). Однако после половодья 2016 г. величина смыва у данного репера изменялась в пределах от 0 (в 2019 г., 2021 г.) до 1,4 м. Возможно, главной причиной такой динамики разрушения берега является характер слагающих его пород.

«Нулевых» значений смыва с 2013 г. не наблюдалось только у реперов 2 и 7. В первом случае расстояние от репера до кромки берега уменьшалось на величину от 0,4 м (в 2014 и 2019 гг.) до 3,5 м (в 2016 г.). У репера №7 минимальное значение смыва составляло 1 м (в 2020 г.), максимальное – 5,6 м (в 2019 г.), а в 2016 г. – 4,2 м. В контрольной точке №1 разрушение береговой линии регистрировалось ежегодно, однако, не отмечено в 2021 г. Здесь минимальная величина смыва наблюдалась в 2014 г. – 0,8 м, а максимальная – в 2020 г. – 4,8 м.

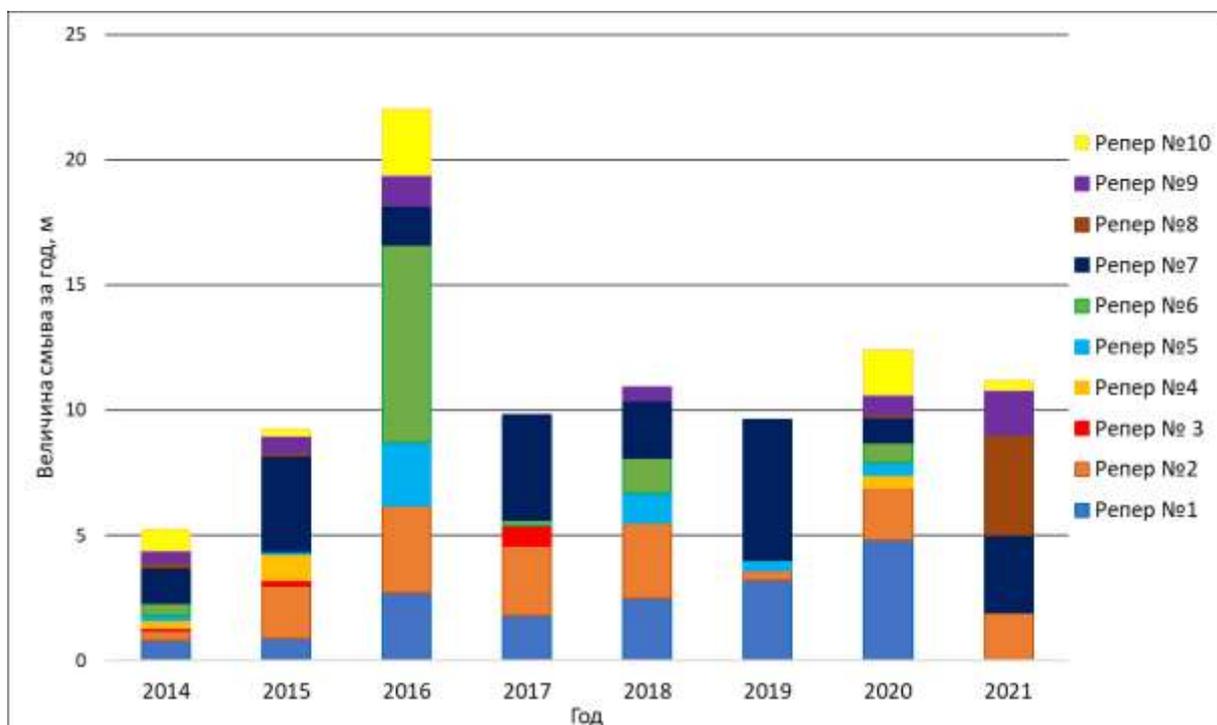


Рис. 3. Ежегодная величина смыва берега р. Вятки в контрольных точках в 2013–2021 гг.

Таким образом, фактические измерения и их графическая интерпретация наглядно показывают, что вследствие русловых процессов р. Вятки происходит изменение территории заповедника «Нургуш» на его береговых участках. Кое-где река «откусывает» берег, а за счет формирования песчаных наносов увеличивает его в других местах.

Согласно нашим предположениям, разрушение берега реки и изменение русла будет обнаруживаться и по космоснимкам. Работы в области мониторинга водных объектов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) ведутся уже достаточно давно. Так, Адамович Т. А. [2] показала, что по космоснимкам возможен анализ русловых процессов. Были выявлены зоны аккумуляции и разрушения берегов р. Вятки в Кирово-Чепецком районе [2]. Некоторые исследования связаны с оценкой экологического состояния водного объекта. На основе различных вегетационных индексов оценивается

степень эвтрофированности водоема [7]. По данным дешифрирования на основе индексов можно не только оценить состояние водоема, но и установить его границы, отделить сушу от поверхности воды. В ходе данной работы важно было выявить индекс, который существенно отличает поверхность воды от суши. Не все индексы позволяют четко установить неизвестные границы водоема. Большинство из них дают сходные показатели для воды и земли. Для установки границы земля–вода был рассмотрен ряд ранее используемых индексов, из которых был выбран индекс NDAI. Этот индекс впервые был предложен для обнаружения фитопланктона в водоемах [8]. Однако при практическом применении он позволил четко установить границы водного объекта по спутниковым снимкам, поскольку было обнаружено резкое отличие показателя для воды и для суши. Спектральные индексы, такие как MCARI, NDVI и NDWI тоже применялись для исследования водоема и тоже позволяли отделить воду от суши. Но, в отличие от NDAI, это срабатывало не на всех снимках.

При попытке проследить разрушение берега в реперных точках заповедника по космоснимкам авторы столкнулись с проблемой, связанной с десятиметровым разрешением спутниковых снимков. Кромка берега может смещаться в пределах одного пикселя, к тому же невозможно определить точную геометрию этой кромки в пределах квадрата 10 на 10 м. Для определения приблизительного смещения кромки берега в пределах 10 м была создана методика расчета на основании значения спектрального индекса.

$$L = \frac{I_{\Pi} - I_B}{I_C - I_B} \times 10, \quad (2)$$

где L – приблизительное расстояние кромки берега от околководной границы пикселя, в метрах.  $I_{\Pi}$  – значение индекса у исследуемого пикселя.  $I_B$  – среднее значение, характерное для воды на индексной карте.  $I_C$  – среднее значение индекса для суши. Результат работы отображен на карте (рис. 4).

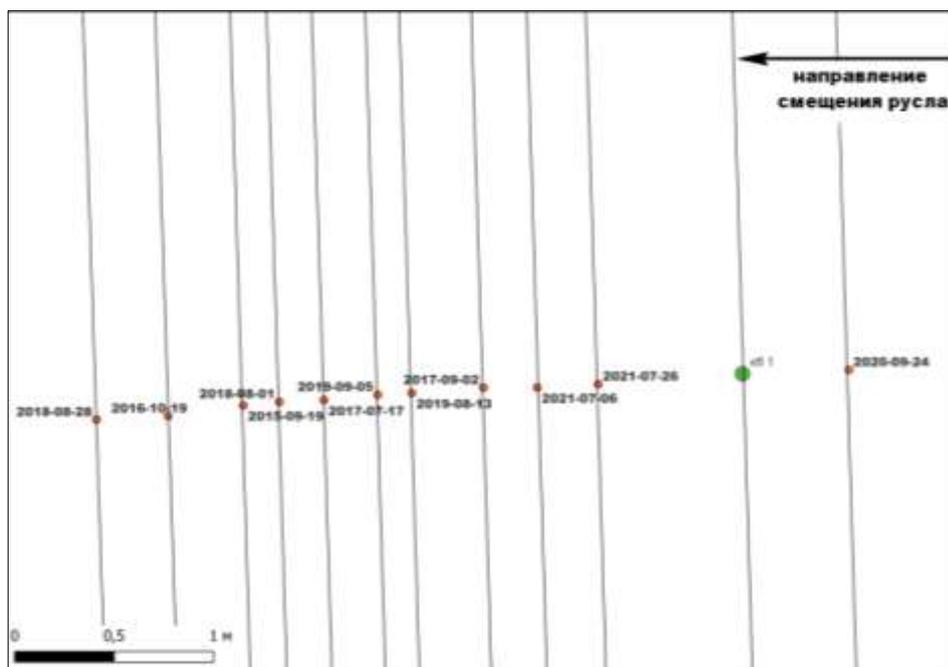


Рис. 4. Положение берега р. Вятки по результатам работы с космоснимками.

На рисунке 4 показаны линии, обозначающие примерное положение берега реки в указанную дату. Меткой «кб 1» обозначена кромка берега реки, поставленная при помощи GPS в 2013 г. Русло реки расположено в правой части рисунка. С 2013 г. происходит

неравномерное смещение береговой линии в сторону от русла реки. Расхождение между крайними линиями составило от 4 до 17 м в разных точках.

Значения индекса NDAI для водной поверхности изменяются от 0,55 до 0,65, среднее значение 0,6. Значение индексов для суши, а точнее, для растительности неравномерно и сильно различается по годам. Обычно оно изменяется от 1,10 до 1,12. Однако на некоторых снимках (24.09.2020, 19.10.2016 и 19.09.2015) он составил 0,95-0,97. Это могло дать искаженные результаты, поскольку оказывается сильное влияние состоянием растительности. Также на результат может повлиять изменяющийся уровень воды в реке. Но это влияние невелико, так как в данном случае рассматривается высокий берег реки, который затапливается незначительно. Основной фактор искажения – это полоса песка, образующаяся между границей воды и растительностью. Со временем эта полоса также смещается, зарастая травой с одной стороны и затапливаясь водой с другой.

Несмотря на то, что точно установить положение границы воды пока не удалось, изучение изменений значений вегетационных индексов по космическим снимкам в пограничных пикселях может считаться перспективным направлением. Предполагается расширение обработки данных с применением других индексов или создание собственного.

### Список литературы:

1. Летопись природы заповедника «Нургуш» за 1995–1996 гг. Книга 1. Рукопись. Фонд ГПЗ «Нургуш». – С. Боровка, 2000. – 307 с.
2. Адамович Т. А. Геоэкологическая оценка и оптимизация системы мониторинга территории в районе Кирово-Чепецкого химического комбината: автореф. дис. ... канд. географических наук: 25.00.36 / Адамович Татьяна Анатольевна; [Место защиты: Юж. федер. ун-т]. – Ростов-на-Дону, 2012. – 28 с.
3. Беркович К. М. Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека / К. М. Беркович, Л. В. Злотина, Л. А. Турыкин // Геоморфология. – 2019. – №2. – С. 3–17. doi: 10.31857/S0435-4281201923-17.
4. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Географический факультет МГУ. 2003. – 355 с.
5. Чалов Р. С. Речные излуины / Р. С. Чалов, А. С. Завадский, А. В. Панин. – М.: изд-во МГУ, 2004. – 371 с.
6. Летопись природы заповедника «Нургуш» за 2016 г. (в 2 ч.). – Кн. XXI. – Киров, 2017. – 542 с.
7. Кутявина Т. И. Применение методов обработки и анализа космических снимков для изучения эвтрофированных водоемов (обзор) / Т. И. Кутявина, Г. Я. Кантор, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 2. – С. 14–25. doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-014-025.
8. Кутявина Т. И. Использование нормализованного относительного альгоиндекса для оценки «цветения» воды в водохранилищах Вятско-Камского Предуралья / Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 60–65. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-060-0654.

## MONITORING OF THE INTENSITY OF EROSION OF THE VYATKA RIVER BANK ON THE TERRITORY OF THE NURGUSH NATURE RESERVE AND PROSPECTS FOR THE USE OF REMOTE SENSING METHODS

Ekaterina V. Rogozhnikova, Vyacheslav V. Rutman

*Abstract. The article describes the results of nine-year observations of the intensity of erosion of the coastline of the Vyatka River on the territory of the Nurgush Nature Reserve. The results of field measurements demonstrate a change in the territory of the reserve due to the erosion of the*

*coast in some areas and an increase in sand deposits in other areas. In order to visually trace the changes in the river bank, the NDAI spectral index was applied, which allows to establish the land-water boundary.*

*Keywords: Nurgush Nature Reserve, remote sensing of the Earth, NDAI index, Vyatka River, monitoring, coastline, fluvial processes, riverbank erosion.*