

## Ретроспективный анализ потери растительного покрова в Республиках Марий Эл и Чувашия после затопления Чебоксарского водохранилища по данным Landsat/MSS

Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьёв

*Поволжский государственный технологический университет*

*Йошкар-Ола, 424000, Россия*

*E-mail: kurbanovea@volgatech.net*

Чебоксарская ГЭС является одним из важных гидроэнергетических проектов в бассейне р. Волги. Поднятие уровня Чебоксарского вдхр. в 1981 г. до отметки 63 м привело к затоплению около 60 тыс. га земель Республик Марий Эл и Чувашии. В результате были утрачены уникальные площади лесных насаждений и водно-болотных угодий на территории обеих республик. В работе проведён ретроспективный анализ потери растительного покрова на территории затопления по данным разновременных спутниковых изображений Landsat/MSS за 1979 г. (до поднятия уровня воды) и 1981 г. (после поднятия). Район исследования включает площади лесных насаждений, расположенных вдоль правого и левого берегов р. Волги с учётом ширины её русла в 1979 г. Для выделения водной поверхности р. Волги и Чебоксарского вдхр. был использован нормализованный дифференцированный водный индекс NDWI. Классификация спутниковых изображений проводилась автоматическим методом анализа данных «Дерево принятия решений» с помощью предикторов NDVI, RED и NIR. Общая точность тематической карты составила 0,87. Результаты тематической классификации затопленной территории показали, что в большей степени по площади были утрачены лесные насаждения (хвойные — 30,1 % и смешанные лиственные — 21,2 %). Далее следуют древесно-кустарниковая растительность (27,6 %) и сельхозугодья (10,4 %). Класс «водные объекты» (болота, озёра) общей площадью 1534 га (2,6 %) также был затоплен. Полученные данные могут быть использованы для региональных оценок (экологических, социальных и экономических) последствий дальнейшего возможного повышения уровня ГЭС до проектной отметки 68 м.

**Ключевые слова:** Чебоксарское водохранилище, LUCC, лесные экосистемы, Landsat/MSS, NDWI, NDVI

Одобрена к печати: 15.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-127-137

### Введение

Смена землепользования и изменения наземного покрова (LUCC — *англ.* Land Use Land Cover Change) в значительной степени происходят в связи с хозяйственной деятельностью человека. На глобальном уровне эти процессы приводят к вырубке лесов, деградации растительного покрова, утрате биоразнообразия и потере уникальных экосистем (The State..., 2018). Ещё одним примером LUCC, которому обычно не уделяют достаточного внимания, несмотря на значительное влияние на природные экосистемы, является строительство речных плотин (гидроэлектростанций (ГЭС)) и создание водохранилищ. Чем крупнее такое водохранилище, тем более существенно его влияние на прилегающие лесные экосистемы. Затопление территорий в процессе подъёма уровня плотин приводит к потерям наземных и прибрежных растительных сообществ, гибели фауны, эрозии почв, болото- и озёрообразованию, нарушению нереста и нагула рыб (Войтко, 2009; Люшвин и др., 2006; Тяптиргянов, 2015; Keken et al., 2015).

В последние десятилетия воздействие плотин и водохранилищ на прилегающие природные экосистемы стало предметом большого количества исследований, в которых оценивались изменения в водной фауне и флоре, влияние подъёма уровня воды на гидрологию рек вниз по течению, крупномасштабная фрагментация среды обитания животных и реакция растительности береговой линии в регулируемых водоёмах в различных странах

(Елсаков, Щанов, 2012; Корпачев и др., 2013; Bauni et al., 2015; Macfarlane et al., 2018; Momm et al., 2014).

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) также находит широкое применение при проведении мониторинга и исследований процессов изменения прибрежной растительности в результате затопления территорий (Курбатова, 2008; Терехов и др., 2020). Для решения таких задач часто используют серию спутниковых снимков Landsat, которые позволяют проводить оценку LUCC за последние десятилетия (Курбанов и др., 2014; Cochran et al., 2017; Li et al., 2016), цифровое моделирование (Digital terrain modelling) и определять гидрологические особенности местности (уклон, зоны дренажа и водосбора) (Feloni et al., 2019). Многие исследователи при оценке уровня подъёма воды используют схему многокритериального анализа решений (MCDA — *англ.* Multi-Criteria Decision Analysis) или метода анализа иерархий (АНР — *англ.* Analytical Hierarchy Process), включая процедуру стандартизации или классификации критериев и определения весов соответствующих факторов для пространственного анализа (Chen et al., 2011; Khosravi et al., 2016).

**Цель работы** — ретроспективный анализ нарушенности (потери) растительного покрова Республики Марий Эл (РМЭ) и Чувашской Республики (ЧР) на территории затопления Чебоксарского вдхр. по данным разновременных спутниковых изображений Landsat/MSS. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- подобраны спутниковые изображения Landsat/MSS на территорию исследования за 1979 г. (до поднятия уровня Чебоксарского вдхр.) и 1981 г. (после затопления) и на их основе сформированы мозаики растров;
- получены тематические карты вегетационных индексов и выделена площадь затопления по различным классам наземного покрова на территорию РМЭ и ЧР;
- определены площади затопленных земель в 1981 г. по данным индекса NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index — нормализованный дифференцированный водный индекс);
- проведена классификация спутниковых изображений по алгоритму «Дерево принятия решений» на основе предикторов: индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), спектральных каналов RED (красный) и NIR (*англ.* near infrared — ближний инфракрасный);
- проведён анализ классов наземного (растительного) покрова, затопленных в процессе подъёма уровня Чебоксарской ГЭС до отметки 63 м.

## Объекты и методика исследований

Объектом исследования явился растительный (лесной) покров на территории РМЭ и ЧР, затопленной Чебоксарским вдхр., до окончания строительства и после его вступления в эксплуатацию (1979–1981). Район исследования включает территорию лесных насаждений вдоль правого и левого берегов р. Волги с учётом ширины её русла в 1979 г.

**Историческая справка.** Чебоксарское вдхр., построенное в 1980 г. путём перекрытия р. Волги у Новочебоксарска, было заполнено в 1981 г. до отметки 63 м. Водоохранилище Чебоксарской ГЭС при существующей отметке имеет протяжённость 252 км, общую площадь — 121,3 тыс. га, полный объём — 4,6 км<sup>3</sup>. Оно расположено на территории трёх субъектов Российской Федерации (Республик Марий Эл и Чувашия, Нижегородской обл.), в зону его воздействия попадают земли 14 административных районов (Слива, 2014). Заполнение Чебоксарского вдхр. до уровня 63 м и его продолжительная эксплуатация нанесли значительный ущерб окружающей среде и хозяйству Нижегородской обл. и двух республик в результате затопления и подтопления территорий, потери сельхозугодий и лесов, вынужденного переселения населения, нарушения транспортных связей, деградации экосистем (Алексеев, 1989; Алексеев и др., 2002). Повышение воды Чебоксарского гидроузла до проектного подпорного уровня на отметке 68 м может привести к ещё большим негативным последствиям для этих территорий.

**Методика.** В работе были использованы безоблачные изображения спутников Landsat-2, -3/MSS (Multispectral Scanner System — многоспектральный сканирующий радиометр) за 1979 и 1981 гг. (табл. 1, рис. 1) на территорию исследования, полученные с портала геологической службы США (United States Geological Survey — USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) со стандартным уровнем обработки (Level-1C). Для исследования использованы четыре спектральных канала (RGB, NIR) сканера Landsat/MSS с пространственным разрешением 60 м. Спутниковые изображения на территорию исследования прошли радиометрическую, атмосферную и геометрическую коррекцию в программном пакете ENVI.

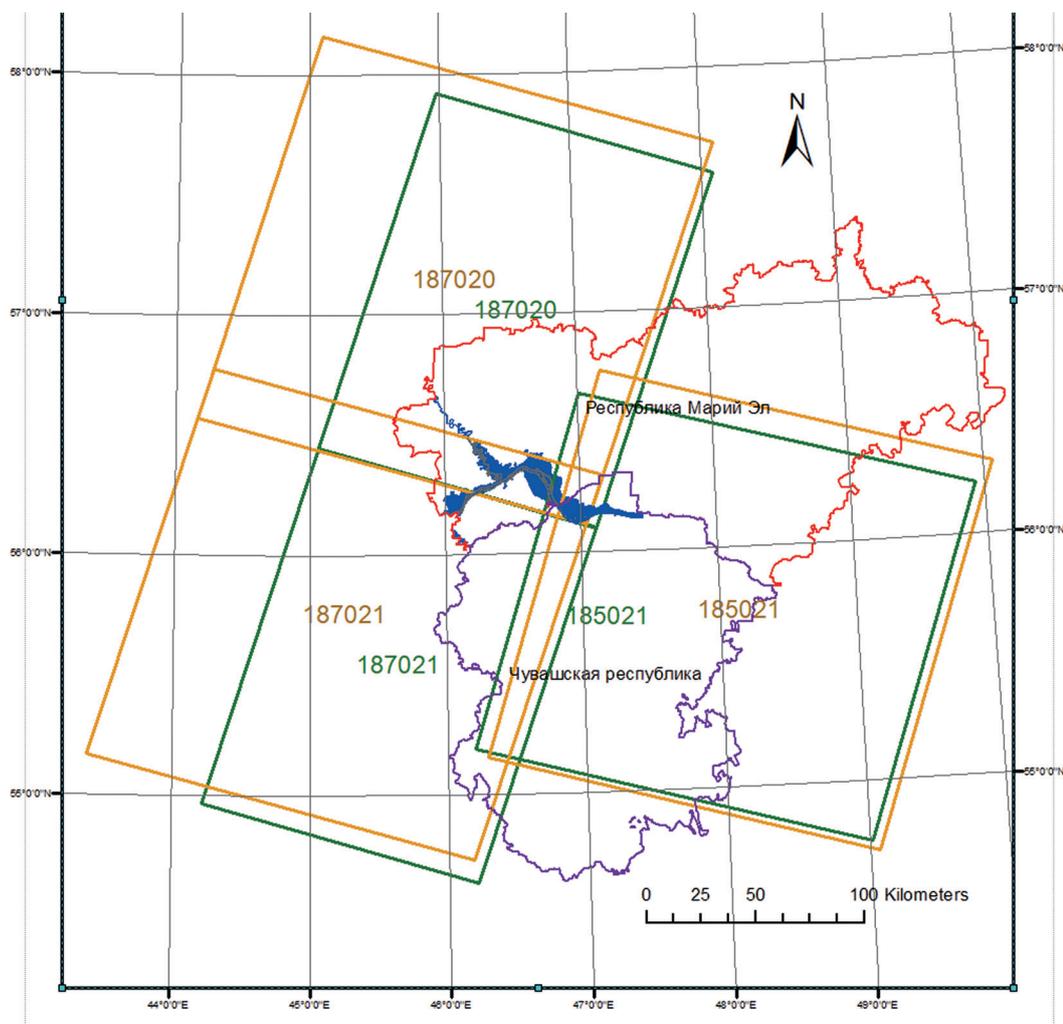
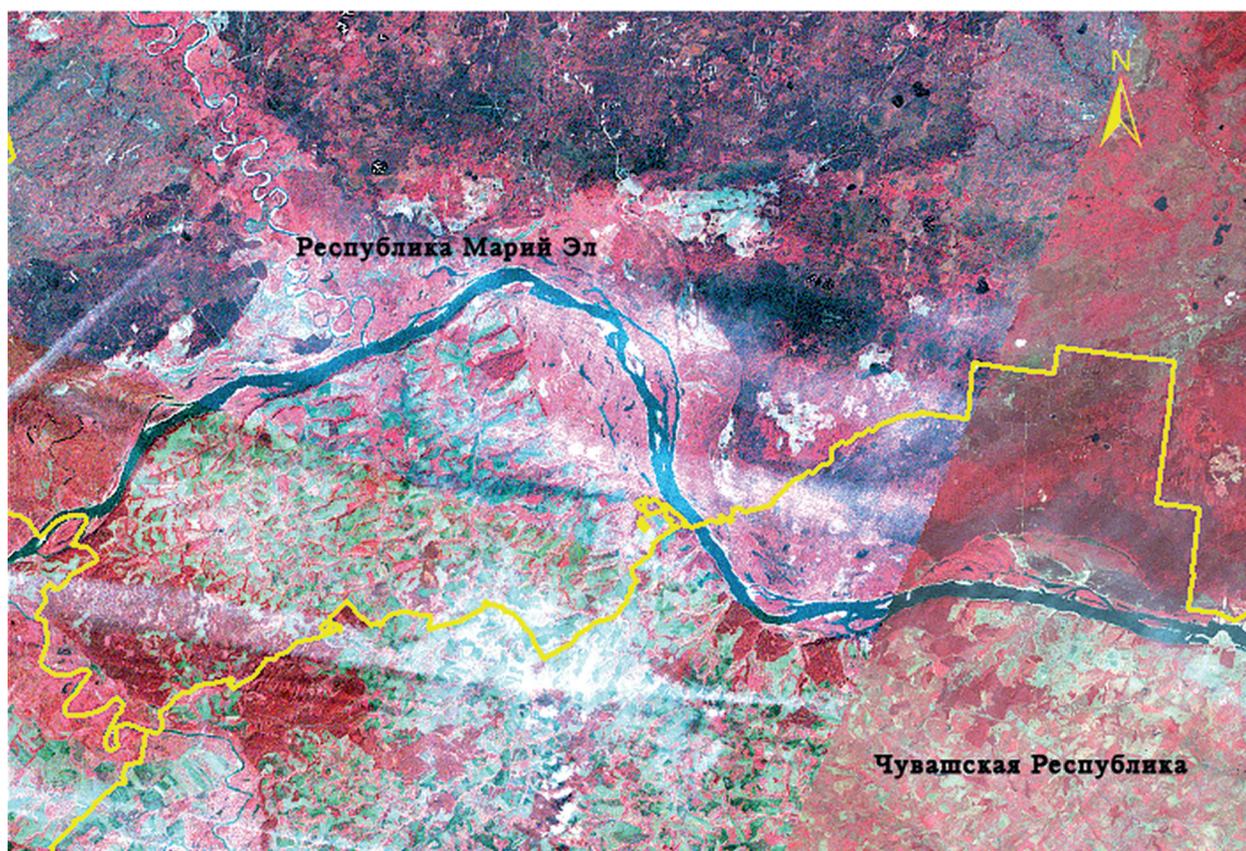


Рис. 1. Покрытие снимками Landsat/MSS за 1979 г. (контур коричневого цвета) и 1981 г. (контур зелёного цвета) района исследований в зоне Чебоксарского вдхр.

Таблица 1. Характеристика используемых изображений MSS Landsat

Номер сцены	Path/Row	Дата съёмки	Спутник
LM02_L1TP_187021_19790626_20180419_01	187/021	26.06.1979	Landsat-2/MSS
LM02_L1TP_187020_19790626_20180419_01	187/020	26.06.1979	Landsat-2/MSS
LM02_L1TP_185021_19790712_20180419_01	185/021	12.07.1979	Landsat-2/MSS
LM03_L1TP_187020_19810624_20180415_01	187/020	24.06.1981	Landsat-3/MSS
LM03_L1TP_187021_19810624_20180415_01	187/021	24.06.1981	Landsat-3/MSS
LM02_L1TP_185021_19810806_20180415_01	185/021	06.08.1981	Landsat-2/MSS



*а*



*б*

Рис. 2. Сцены спутниковых снимков Landsat/MSS в псевдоцветах на территорию Чебоксарского вдхр.: *а* — 1979 г. (до затопления Чебоксарского вдхр.); *б* — 1981 г. (после затопления)

Для выделения водной поверхности р. Волги и Чебоксарского вдхр. был использован нормализованный дифференцированный водный индекс NDWI, определяемый по формуле:

$$NDWI = (GREEN - NIR)/(GREEN + NIR),$$

где GREEN (зелёный) и NIR — значения спектральной яркости в зелёной и ближней инфракрасной областях спектра (McFeeters, 1996). Этот индекс варьирует от  $-1$  до  $+1$ , демонстрируя положительные значения на водной поверхности, что позволяет успешно различать её на спутниковых изображениях. В работе на основании индекса NDWI были выделены растровые маски (с последующей векторизацией) русла р. Волги в 1979 г. (до поднятия уровня воды) и Чебоксарского вдхр. в 1981 г. для территории РМЭ и ЧР (рис. 2, см. с. 130).

В исследовании был применён автоматический метод анализа данных «Дерево принятия решений» (Decision tree) (ДР), который используется в машинном обучении, классификации изображений ДЗЗ, интеллектуальном анализе и статистике. К преимуществам ДР относится возможность объединения сложных параметров, связанных с рельефом местности, текстурой, спектральным и пространственным распределением объектов наземного покрова, используемых для повышения точности классификации спутниковых изображений (Liu et al., 2018). Для оценки растительного покрова площади затопления Чебоксарского вдхр. до отметки 63 м в 1981 г. был применён автоматический модуль «Дерево решений» в пакете ENVI. В качестве основных предикторов растительного (лесного) покрова использованы пороговые значения индекса NDVI, который широко используется в дистанционном зондировании (Курбанов, Воробьёв, 2020), и значения спектральных каналов RED и NIR Landsat/MSS. В результате были определены площади затопления классов растительного (лесного) покрова и Чебоксарского вдхр. после поднятия уровня ГЭС до отметки 63 м (рис. 3).

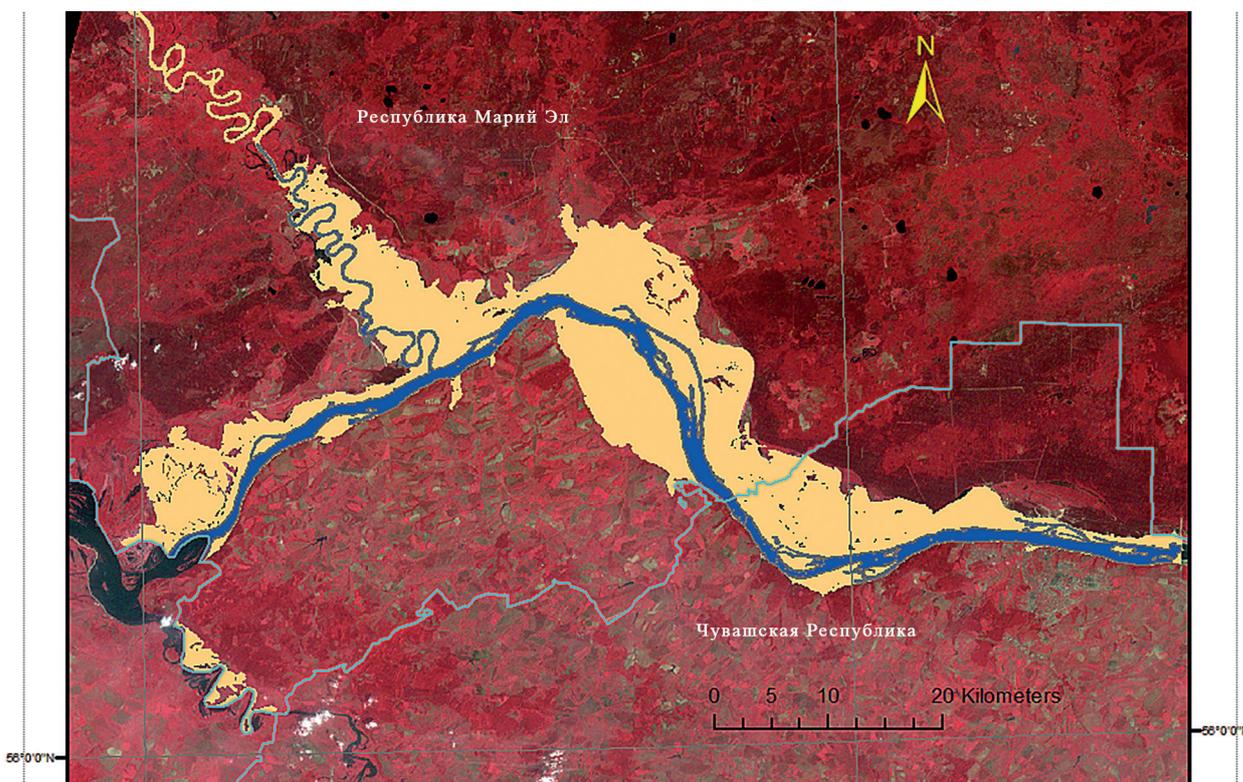


Рис. 3. Наложение векторных слоёв на территорию РМЭ и ЧР. Русло р. Волги до затопления (1979) показано синим цветом, после него (1981) — светло-коричневым

На первом этапе принятия решения по методике ДР на спутниковом изображении проводится разделение тематических классов растительного покрова по значениям индекса

NDVI. По архивным лесоустроительным данным прибрежных лесничеств (1970-е гг.) были предварительно установлены следующие классы наземного (растительного) покрова:

1. Лесной покров (средневозрастные и старше), включающий смешанные (в основном лиственные) (Deciduous) и хвойные (Conifer) насаждения ( $NDVI > 0,6$ ).
2. Древесно-кустарниковая растительность (Shrubs), включающая молодняки хвойных и лиственных пород ( $NDVI 0,46-0,6$ ).
3. Травянистый покров, включая сельскохозяйственные угодья (Grass) ( $NDVI 0,3-0,45$ ).
4. Открытые участки местности, свободные от растительности (Bare) ( $NDVI \leq 0,3$ ).

На основе принятых классов наземного (растительного) покрова и соответствующих значений NDVI, RED и NIR в пакете ENVI сформирован алгоритм ДР (рис. 4), с помощью которого была проведена управляемая классификация сцены спутника Landsat/MSS за 1979 г. на территорию исследования, в дальнейшем ушедшей под Чебоксарское вдхр. Учитывая низкое пространственное разрешение спутниковых данных Landsat/MSS (60 м), на этом этапе управляемой классификации проводится более точное выделение классов наземного покрова, включая водные объекты, по спектральным сигнатурам.

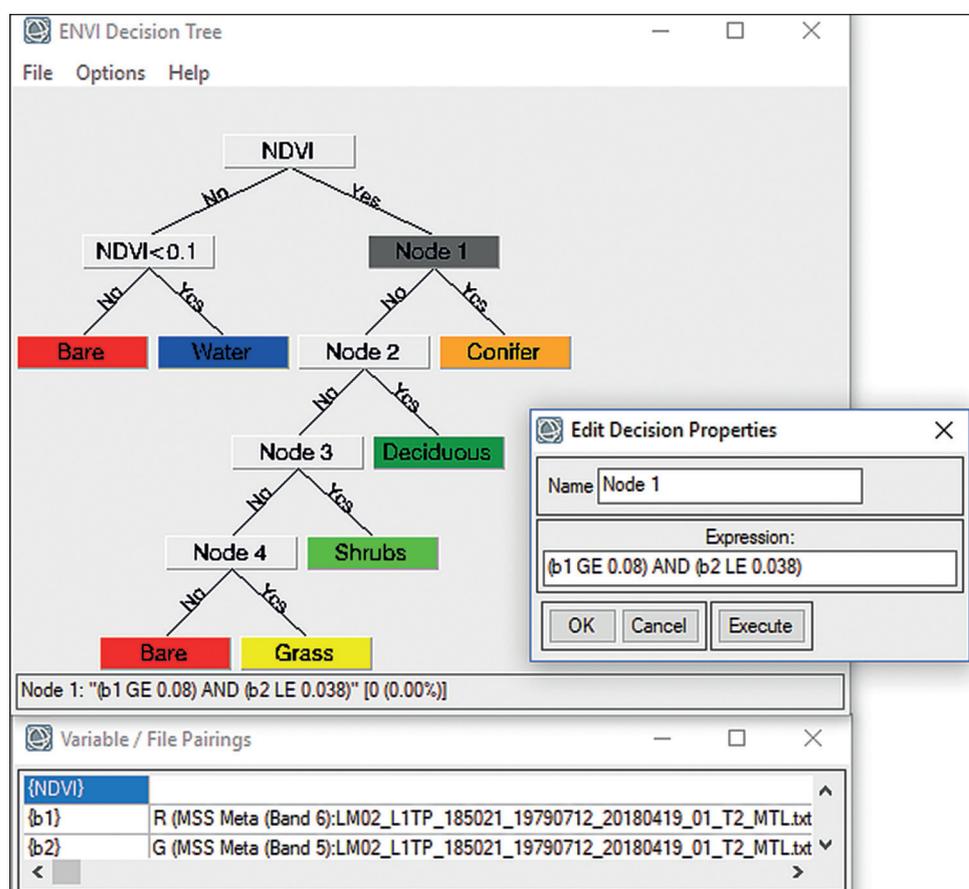


Рис. 4. Алгоритм «Дерево решений» на базе предикторов NDVI, RED и NIR

Каждый из узлов «дерева решений» (Node 1–4) предлагает бинарные решения по классам наземного покрова, основанные на спектральных значениях соответствующих предикторов. Например, для узла Node 1 решение по классу «хвойные» принимается на основании данных канала b1 (минимальное значение спектральной яркости канала NIR) и b2 (максимальное значение RED) (см. рис. 4). Не соответствующие этим спектральным показателям данные обрабатываются далее в Node 2, в котором проводится последующее разделение на другие классы наземного (растительного) покрова.

Для тематических классов «лиственные» и «древесно-кустарниковые» после алгоритма ДР дополнительно проводилась неуправляемая классификация, что позволило повысить точность их выделения на спутниковых изображениях. Вновь полученные тематические карты прошли процедуру генерализации в программном пакете ENVI с плавающим окном  $3 \times 3$  пикселя и векторизацию в программном пакете ArcMap. Для оценки точности классификации по архивным лесоустроительным материалам были дополнительно подобраны 120 тестовых участков, репрезентативно представляющих все исследуемые классы, исключая водные поверхности. Точность тематических карт оценивалась специализированными критериями: общей точностью классификации и каппа-статистикой.

## Результаты исследования

Региональные оценки LULC обычно основаны на последовательных изменениях в землепользовании, обусловленных экономическими, институциональными, демографическими и рыночными механизмами. В работе по данным разновременных спутниковых изображений Landsat/MSS проведён ретроспективный анализ последствий антропогенного воздействия (затопление земель после введения в эксплуатацию Чебоксарской ГЭС) на растительный покров РМЭ и ЧР. Архивные лесоустроительные и спутниковые данные Landsat/MSS позволили определить основные тематические классы (вид пользования) и площади утраченных растительных экосистем (рис. 5).

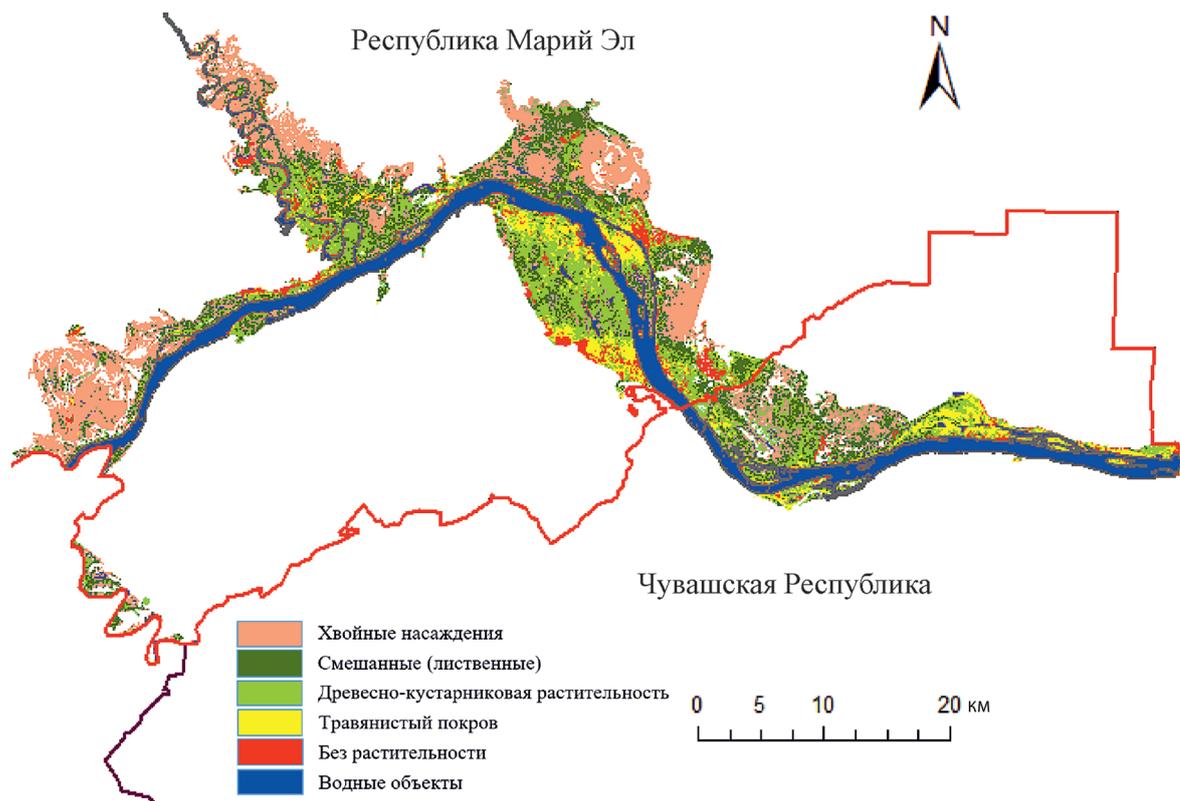


Рис. 5. Карта классов наземного (растительного) покрова 1979 г., затопленного Чебоксарским вдхр.

Общая точность тематической классификации составила 0,87. Значение статистики каппа 0,83 также свидетельствует о высокой степени соответствия полученных данных экспериментальным. В целом проведённое исследование свидетельствует о приемлемости использования спутниковых данных Landsat/MSS в ретроспективных оценках и комбинировании с более современными изображениями, особенно для больших территорий.

Поднятие уровня Чебоксарского вдхр. в 1981 г. до отметки 63 м привело к затоплению 45 946,3 га территории РМЭ и 12 741 га территории ЧР. При этом в большей степени по площади были утеряны лесные насаждения (хвойные — 30,1 % и лиственные — 21,2 %). Далее следуют древесно-кустарниковая растительность (27,6 %) и сельхозугодья (10,4 %) (табл. 2). Класс «водные объекты» общей площадью 1534 га (2,6 %) (болота, озёра, которые располагались по обе стороны русла Волги на исследуемой территории), был также затоплен в процессе подъёма уровня Чебоксарского вдхр.

Таблица 2. Распределение площади затопленных земель по основным классам наземного покрова

Класс	Площадь, га/%	
	РМЭ	ЧР
Хвойные	15 540,4/20,6	2 129,1/16,7
Смешанные (лиственные)	9 588,8/23,0	2 878,6/22,6
Древесно-кустарниковые	11 915,8/25,7	4 305,2/33,8
Трава (сельхозугодья)	4 187,5/17,0	1 889,6/14,8
Непокрытые растительностью (включая населённые пункты)	3 853,1/11,8	865,8/6,8
Вода	860,7/1,9	672,8/5,3
Итого	45 946,3/100	12 741,1/100

При разработке классов наземного покрова был также выделен небольшой класс «непокрытые растительностью» (населённые пункты, песчаные отмели и небольшие острова, расположенные в русле Волги). Земли этого класса составили до затопления в 1979 г. в РМЭ 3853 га (11,6 %), в ЧР — 866 га (6,8 %).

В целом в результате ретроспективного анализа спутниковых данных Landsat/MSS были получены данные по ЛУСС на территории Республик Чувашия и Марий Эл. Повышение уровня ГЭС до отметки 63 м привело в первую очередь к значительному сокращению древесного покрова на общей площади 46,4 тыс. га (79 %), затопленной Чебоксарским вдхр. При этом в большей степени затоплению подверглись насаждения левого берега (песчаной низменности) р. Волги.

Результаты исследования могут быть использованы для региональных (экологических, социальных и экономических) оценок последствий дальнейшего повышения уровня Чебоксарской ГЭС до проектной отметки 68 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-55-80010).

## Литература

1. Алексеев И. А. Ущерб Марийской АССР от затопления ее земель Чебоксарской ГЭС // Комплексная оценка результатов строительства и эксплуатации Чебоксарской ГЭС. Горький, 1989. С. 60–64.
2. Алексеев И. А., Демаков Ю. П., Колесов А. В. Экологический мониторинг лесов берегов водохранилища Чебоксарской ГЭС: Научный отчёт по теме № 063/02. Йошкар-Ола, 2002. 98 с.
3. Войтко П. Ф. Использование лесов Республики Марий Эл для строительства и эксплуатации искусственных водных объектов // Вестн. Марийского гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2009. № 3. С. 75–83.
4. Елсаков В. В., Щанов В. М. Спутниковые снимки в анализе изменений экосистем бассейна реки Вычегда // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 135–135.
5. Корпачев В. П., Пережилин А. И., Андрияс А. А., Гайдуков Г. А. Оценка объёмов затопления древесной массы в ложах водохранилищ ГЭС // Фундаментальные исслед. 2013. № 4. С. 290–294.

6. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2020. 266 с.
7. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестн. Поволжского гос. техн. ун-а. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. Т. 21. № 1. С. 18–32.
8. Курбатова И. Е. Космический мониторинг береговой зоны Краснодарского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 523–528.
9. Люшвин П. В., Зырянов В. Н., Егоров С. Н., Кухарский А. В., Полонский В. Ф., Коршенко А. Н., Лобов А. Л. Влияние пиковых попусков с Волгоградской ГЭС на экологию Северо-Западного Каспия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. № 2. С. 121–129.
10. Слива И. В. История гидроэнергетики России. Тверь: Тверская Типография, 2014. 302 с.
11. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарьи (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 255–260.
12. Тяптыргянов М. М. Влияние каскада Вилюйской НЭС на популяции рыб бассейна реки Вилюй // Вестн. Северо-Восточного федерального ун-та им. М. К. Аммосова. 2015. Т. 48. № 4. С. 27–33.
13. Vauni V., Schivo F., Capmourteres V., Homberg M. Ecosystem loss assessment following hydroelectric dam flooding: The case of Yacyreta, Argentina // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2015. V. 1. P. 50–60.
14. Chen Y. R., Yeh C. H., Yu B. Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan // Natural Hazards. 2011. V. 59. No. 3. P. 1261–1276.
15. Cochran S. M. V., Matricard E. A. T., Numatac I., Lefebvre P. A. Landsat-based analysis of mega dam flooding impacts in the Amazon compared to associated environmental impact assessments: Upper Madeira River example 2006–2015 // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2017. V. 7. P. 1–8.
16. Feloni E., Mousadis I., Baltas E. Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach — The case of Attica region // J. Flood Risk Management. 2019. V. 13(S1). Art. No. e12563. 15 p.
17. Keken Z., Panagiotidis D., Skalos J. The influence of damming on landscape structure change in the vicinity of flooded areas: Case studies in Greece and the Czech Republic // Ecological Engineering. 2015. V. 74. P. 448–457.
18. Khosravi K., Nohani E., Maroufinia E., Pourghasemi H. R. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: A comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multicriteria decision-making technique // Natural Hazards. 2016. V. 83. No. 2. P. 947–987.
19. Li W., Qinb Y., Sunc Y., Huang H., Linge F., Tian L., Ding Y. Estimating the relationship between dam water level and surface water area for the Danjiangkou Reservoir using Landsat remote sensing images // Remote Sensing Letters. 2016. V. 7. No. 2. P. 121–130.
20. Liu Y., Gong W., Hu X., Gong J. Forest type identification with random forest using Sentinel-1A, Sentinel-2A, Multi-Temporal Landsat-8 and DEM Data // Remote Sensing. 2018. V. 10(946). P. 2–25.
21. Macfarlane W. W., Gilbert J. T., Gilbert J. D., Saunders W. C., Hough-Snee N., Hafen C., Wheaton J. M., Bennet S. N. What are the conditions of riparian ecosystems? Identifying impaired floodplain ecosystems across the Western U.S. using the riparian condition assessment (RCA) tool // Environmental Management. 2018. V. 62. P. 548–570.
22. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 7. P. 1425–1432.
23. Momm H. G., Bingner R. L., Yuan Y., Locke M. A., Wells R. R. Spatial characterization of riparian buffer effects on sediment loads from watershed systems // J. Environmental Quality. 2014. V. 43. No. 5. P. 1736–1753.
24. The State of the World's Forests 2018 — Forest pathways to sustainable development. FAO. Rome, 2018. 118 p.

## Retrospective analysis of vegetation cover loss in Republics of Mari El and Chuvashia after flooding of Cheboksarskaya dam from Landsat/MSS data

E. A. Kurbanov, O. N. Vorob'ev

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola 424000, Russia  
E-mail: kurbanovea@volgatech.net

Cheboksarskaya hydroelectric power plant is an important hydropower project in Volga River basin of Russia. The rise of the Cheboksarskaya dam level in 1981 to a mark of 63 m led to flooding of about 60 thousand hectares of the Republics Mari El and Chuvashia. As a result, the unique areas of forest cover and wetlands in both republics were lost. In the research, a retrospective analysis of the loss of vegetation cover under the flooded area was carried out with the use of multitemporal Landsat/MSS images of 1979 (prior to the dam) and 1981 (after the 63 m height was reached). The study area includes forests located along the right and left banks of the Volga River, taking into account the width of riverbed in 1979. To identify the water surface of the Volga River and the Cheboksarskaya dam, the Normalized Difference Water Index (NDWI) was used. The classification of satellite images was carried out by an automatic "Decision tree" method using predictors of NDVI, Red and NIR. Overall accuracy of the 1979 thematic map was 0.87. The results of the thematic classification of the flooded area showed that forest stands were lost to a greater extent by area (coniferous 30.1 % and mixed deciduous 21.2 %). This is followed by shrubs (27.6 %) and grass (agricultural lands) (10.4 %). The "water" class (swamps, lakes) with a total area of 1534 ha (2.6 %) also were lost. The research results should help improve regional assessments (environmental, social and economic) of the consequences of a further possible increase in the power station level to the initially projected mark of 68 m.

**Keywords:** Cheboksarskaya dam, LUCC, forest ecosystems, Landsat/MSS, NDWI, NDVI

Accepted: 15.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-127-137

### References

1. Alekseev I.A., Ushcherb Mariiskoi ASSR ot zatopeniya ee zemel' Cheboksarskoi GES (Damage to the Mari Autonomous Soviet Socialist Republic from the flooding of its lands by the Cheboksarsky Hydro Powers Station), In: *Kompleksnaya otsenka rezul'tatov stroitel'stva i ekspluatatsii Cheboksarskoi GES* (Comprehensive assessment of the results of construction and operation of the Cheboksarsky Hydro Powers Station), Gorky, 1989, pp. 60–64.
2. Alekseev I.A., Demakov Yu. P., Kolesov A. V., *Ekologicheskii monitoring lesov beregov vodokhranilishcha Cheboksarskoi GES. Nauchnyi otchet po teme No. 063/02* (Environmental monitoring of forests on the banks of the Cheboksary Hydro Powers Station's reservoir. Research report No. 063/02), Ioshkar-Ola, 2002, 98 p.
3. Voitko P.F., Ispol'zovanie lesov Respubliki Marii El dlya stroitel'stva i ekspluatatsii iskusstvennykh vodnykh ob'ektov (Using of the Republic Mari El forests for the construction and operation of artificial water bodies), *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2009, No. 3, pp. 75–83.
4. Elsakov V.V., Shchanov V.M., Sputnikovye snimki v analize izmenenii ekosistem basseina reki Vyhegda (Satellite data in analysis of changes in ecosystems of the Vyhegda River basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 135–145.
5. Korpachev V.P., Perezhilin A.I., Andriyas A.A., Gaidukov G.A., Otsenka ob'emov zatopeniya drevesnoi massy v lozhakh vodokhranilishch GES (Estimation of wood volume flooding in the beds of hydroelectric power station reservoirs), *Fundamental'nye issledovaniya*, 2013, No. 4, pp. 290–294.
6. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote sensing in forestry), Ioshkar-Ola: PGU, 2020, 266 p.
7. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnina S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Chetyre desyatiletiya issledovaniy lesov po snimkam Landsat (Four decades of forest research with the use of Landsat images), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2014, Vol. 21, No. 1, pp. 18–32.

8. Kurbatova I. E., Kosmicheskii monitoring beregovoi zony Krasnodarskogo vodokhranilishcha (Space monitoring of the coastal zone of the Krasnodar reservoir), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 523–528.
9. Lyushvin P. V., Zyryanov V. N., Egorov S. N., Kukharskii A. V., Polonskii V. F., Korshenko A. N., Lobov A. L., Vliyanie pikovykh popuskov s Volgogradskoi GES na ekologiyu Severo-Zapadnogo Kaspiya (Impact of peak releases from the Volgograd hydro power station on the ecology of the Northwestern Caspian), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 2, pp. 121–129.
10. Sliva I. V., *Istoriya gidroenergetiki Rossii* (The history of hydropower in Russia), Tver: Tverskaya Tipografiya, 2014, 302 p.
11. Terekhov A. G., Abaev N. N., Lagutin E. I., Sputnikovyi monitoring Sardobinskogo vodokhranilishcha v basseine reki Syrdar'i (Uzbekistan) do i posle proryva damby 1 maya 2020 g. (Satellite monitoring of the Sardoba Reservoir in Syr Darya River basin (Uzbekistan) before and after the dam collapses on May 1, 2020), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 255–260.
12. Tyaptirgyanov M. M., Vliyanie kaskada Vilyuiskoi NES na populyatsii ryb basseina reki Vilyui (Influence of the Vilyuisk hydroelectric power plant cascade on the fish populations in the Vilyui river basin), *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta imeni M. K. Ammosova*, 2015, Vol. 48, No. 4, pp. 27–33.
13. Bauni V., Schivo F., Capmourteres V., Homberg M., Ecosystem loss assessment following hydroelectric dam flooding: The case of Yacyreta, Argentina, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2015, Vol. 1, pp. 50–60.
14. Chen Y. R., Yeh C. H., Yu B., Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan, *Natural Hazards*, 2011, Vol. 59, No. 3, pp. 1261–1276.
15. Cochran S. M. V., Matricardib E. A. T., Numatac I., Lefebvred P. A., Landsat-based analysis of mega dam flooding impacts in the Amazon compared to associated environmental impact assessments: Upper Madeira River example 2006–2015, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017, Vol. 7, pp. 1–8.
16. Feloni E., Mousadis I., Baltas E., Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach — The case of Attica region, *J. Flood Risk Management*, 2019, Vol. 13(S1), Art. No. e12563, 15 p.
17. Keken Z., Panagiotidis D., Skalos J., The influence of damming on landscape structure change in the vicinity of flooded areas: Case studies in Greece and the Czech Republic, *Ecological Engineering*, 2015, Vol. 74, pp. 448–457.
18. Khosravi K., Nohani E., Maroufinia E., Pourghasemi H. R., A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: A comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multicriteria decision-making technique, *Natural Hazards*, 2016, Vol. 83, No. 2, pp. 947–987.
19. Li W., Qinb Y., Sunc Y., Huang H., Linge F., Tian L., Ding Y., Estimating the relationship between dam water level and surface water area for the Danjiangkou Reservoir using Landsat remote sensing images, *Remote sensing letters*, 2016, Vol. 7, No. 2, pp. 121–130.
20. Liu Y., Gong W., Hu X., Gong J., Forest type identification with random forest using Sentinel-1A, Sentinel-2A, Multi-Temporal Landsat-8 and DEM Data, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(946), pp. 2–25.
21. Macfarlane W. W., Gilbert J. T., Gilbert J. D., Saunders W. C., Hough-Snee N., Hafen C., Wheaton J. M., Bennet S. N., What are the conditions of riparian ecosystems? Identifying impaired floodplain ecosystems across the Western U.S. using the riparian condition assessment (RCA) tool, *Environmental Management*, 2018, Vol. 62, pp. 548–570.
22. McFeeters S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 7, pp. 1425–1432.
23. Momm H. G., Bingner R. L., Yuan Y., Locke M. A., Wells R. R., Spatial characterization of riparian buffer effects on sediment loads from watershed systems, *J. Environmental Quality*, 2014, Vol. 43, No. 5, pp. 1736–1753.
24. *The State of the World's Forests 2018 — Forest pathways to sustainable development*, FAO, Rome, 2018, 118 p.