Оценка затопления растительного покрова в республиках Марий Эл и Чувашия при подъёме Чебоксарского водохранилища до отметки 68 м по данным ДЗЗ

О. Н. Воробьёв, Э. А. Курбанов

Поволжский государственный технологический университет

Йошкар-Ола, 424000, Россия

E-mail: vorobievon@volgatech.net

Строительство плотин гидроэлектростанций в бассейнах рек — один из альтернативных вариантов по выработке «экологически чистой» энергии, востребованной на российском и международном рынках. С другой стороны, проекты такого типа негативно влияют на состояние прибрежных растительных экосистем. В работе проведена оценка потенциальных потерь лесных экосистем в районе Чебоксарского вдхр. при возможном подъёме воды Чебоксарской ГЭС с отметки 63 м до проектного уровня 68 м по данным спутниковой съёмки Sentinel-2 и цифровой модели рельефа. Район исследования включает участки растительного покрова, расположенные вдоль правого и левого берегов р. Волги с учётом ширины её русла в 2020 г. в границах республик Марий Эл и Чувашия. Классификация спутниковых изображений для оценки наземного покрова на территории исследования проводилась методом неуправляемой классификации Isodata. Идентификация восьми классов наземного (растительного) покрова на полученной тематической карте проводилась на основе имеющихся данных лесоустройства и полевых исследований в районе изысканий за 2012–2019 гг. Оценка тематических классов методом Джеффриса — Матуситы показала их приемлемую спектральную разделимость для целей исследования. Общая точность тематической карты 2020 г. составила 0,88. Результаты тематической классификации исследуемой территории предполагаемого затопления показали, что в большей степени по площади могут быть утеряны лесные насаждения (сосновые — 6,8 %, берёзовые — 27,5 % и смешанные лиственные — 27,6 %). Далее следуют молодняки/кустарниковая растительность (18,6 %) и водные объекты (10,5 %). При подъёме уровня воды Чебоксарской ГЭС до уровня 68 м Республика Марий Эл может потерять в 4,5 раза больше земель, чем Чувашская Республика. Полученные данные могут быть использованы для региональных оценок (экологических, социальных и экономических) последствий возможного повышения уровня Чебоксарской ГЭС.

Ключевые слова: Чебоксарское водохранилище, лесные экосистемы, Sentinel-2, ЦМР, NDWI, Isodata

Одобрена к печати: 02.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225

Введение

Природные экосистемы бассейнов крупных рек, сформировавшиеся в результате повторяющейся эрозии, отложения наносов и сложных процессов обмена подземных и поверхностных вод, представляют собой важные буферные зоны, прилегающие к водотокам. Они отвечают за гидрологические и экологические функции в водотоках, затевают их поверхность, повышают качество воды, а также становятся местом формирования видового и ценотического биоразнообразия экосистем (Momm et al., 2014).

Между тем экосистемы, расположенные вдоль русел больших рек, находятся под постоянным риском затопления в результате повышения уровня воды во время весенних паводков (Ricci et al., 2019). Многие исследования показывают, что частота наводнений во всём мире в связи с меняющимся климатом увеличивается как по количеству, так и по интенсивности (Бузин и др., 2014; Di Baldassarre et al., 2010; Madsen et al., 2014). Другим фактором нарушений прибрежных экосистем оказывается деятельность человека, выражающаяся в ведении сельского хозяйства, выпасе скота, вырубке лесов, чрезмерной застройке и строительстве плотин гидроэлектростанций (ГЭС) (Курбанов, Воробьёв, 2021; Люшвин и др., 2006; Macfarlane et al.,

2018). В связи с этим прогнозирование и моделирование последствий затопления прибрежных растительных экосистем в результате антропогенного и природного повышения уровня воды рек представляет собой важное направление современных исследований.

Для решения вопросов оценки, картографирования рисков и мониторинга гидрологии речных бассейнов широко применяют мультиспектральные спутниковые изображения, доступность и пространственное разрешение которых растёт с каждым годом (Жарко и др., 2018; Курбанов, Воробьёв, 2020; Терехов и др., 2020). В таких исследованиях обычно анализируется динамика площади и уровня водной поверхности, которая с высокой степенью точности определяется по комплексу данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наземных измерений (Курбатова, 2008; Abarca-Del-Rio et al., 2012; Cooley et al., 2017; Rokni et al., 2014). Кроме того, часто используется цифровое моделирование местности (*англ.* Digital Terrain Modelling) и гидрологические особенности местности (уклон, зоны дренажа и водосбора) (Feloni et al., 2019).

Ключевой показатель точности при оценке возможного повышения уровня воды водоёмов и затопления растительного покрова — цифровая модель рельефа (ЦМР) местности (Jarihani et al., 2015; Stanislawski et al., 2018). ЦМР содержит информацию о высотах рельефа непосредственно земной поверхности, тогда как ЦММ (цифровая модель местности) включает в себя также высоты поверхности природных и антропогенных объектов над определённой вертикальной точкой отсчёта. Точность ЦМР при отображении поверхности земли в основном зависит от пространственного разрешения исходных данных (Shi et al., 2014). Результаты моделирования зон затопления водных объектов в значительной степени зависят от источника получения используемых данных ЦМР, среди которых наиболее распространёнными являются: радиолокационная топографическая миссия шаттла (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission — SRTM), лидары (*англ.* Light Detection and Ranging — LIDAR) и национальные системы высот (Shawky et al., 2019; Vaze et al., 2010).

Цель работы — провести оценку потерь растительного покрова, произрастающего вдоль Чебоксарского вдхр. на территории Республики Марий Эл (РМЭ) и Чувашской Республики (ЧР) при потенциальном поднятии Чебоксарской ГЭС до целевой отметки 68 м. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- подобраны спутниковые изображения Sentinel-2 и сформирована мозаика их растров за 2020 г. на исследуемую территорию;
- по данным ЦММ SRTM, спутниковых и лесоустроительных данных за 2000 г. была получена ЦМР местности и выделен участок потенциального затопления на территории РМЭ и ЧР при проектируемом подъёме Чебоксарской ГЭС до отметки 68 м;
- выполнена тематическая классификация наземного (растительного) покрова территории потенциального затопления по данным Sentinel-2;
- проведена оценка потерь площадей лесных экосистем при возможном повышении уровня Чебоксарского вдхр.

Материалы и методы исследований

Методика. Для оценки потенциального затопления площади территорий республик Марий Эл и Чувашии при поднятии уровня водохранилища с отметки 63 м до отметки 68 м были использованы три спутниковые сцены Sentinel-2 с уровнем обработки Level-1C, сделанные 29 октября 2020 г. (*рис. 1*, см. с. 216). Снимки получены с портала европейской программы «Коперник» (Copernicus) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Работа с изображениями проводилась в программных комплексах ENVI и ArcGIS.

В исследовании были использованы четыре спектральных канала (RGB — Red (красный), Green (зелёный), Blue (синий), NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный) каждого изображения Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Снимки были сформированы в виде мозаики растров, которые прошли предварительную радиометрическую, атмосферную и геометрическую коррекцию в программном комплексе SNAP ESA (<https://eo4society.esa.int/resources/snap/>).

Рис. 1. Покрывение спутниковыми снимками Sentinel-2 2020 г. (псевдоцвета) района исследований в зоне Чебоксарского вдхр.

Выделение границ береговой зоны р. Волги и Чебоксарского вдхр. проводилось на основе нормализованного дифференцированного водного индекса (Normalized Difference Water Index — NDWI), который определяется по формуле:

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

где Green и NIR — значения спектральных каналов в зелёной и ближней инфракрасной областях спектра (McFeeters, 1996). Этот индекс варьирует от -1 до $+1$, демонстрируя положительные значения на водной поверхности, что позволяет их успешно различать на спутниковых изображениях. Использование NDWI позволило выделить векторные маски русла р. Волги и бассейна Чебоксарского вдхр., площади которых были исключены из последующей обработки изображений.

В работе использованы четыре фрагмента (тайла, *англ.* tiles) ЦММ на исследуемую территорию, полученных по данным SRTM NASA (National Aeronautics and Space Administration — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США), с пространственным разрешением 30 м (<https://dwtkns.com/srtm30m/>). В программном пакете ArcGIS-10.8 пространственная привязка ЦММ, включающей высоту растительного (лесного) покрова, и снимков Sentinel-2 была преобразована из проекции Меркатора (UTM — Universal Transverse Mercator) с эллипсоидом WGS-84 (*англ.* World Geodetic System 1984) в картографическую систему координат СК-42 (эллипсоид Красовского), которая была использована ПАО «РусГидро» при проведении геодезических работ по проектированию Чебоксарского вдхр. Для преобразования ЦММ в ЦМР на исследуемой территории были случайным образом подобраны дополнительные 100 участков с лесным покровом (25 на каждый лесной класс). Для каждого из них были определены средние высоты древо-

стоев в 2000 г. по лесоустроительным данным прилегающих к Чебоксарскому вдхр. лесничеств и данным полевых исследований Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (ЦУДМЛ ПГТУ). Это позволило скорректировать ЦМР на 2000 г. с учётом средних высот насаждений каждого исследуемого лесного класса наземного покрова. При этом средняя высота для сосновых насаждений составила 14,5 м, берёзовых — 12,3 м, смешанных — 10,5 м, молодняков — 6,7 м.

Координаты верхних точек выравненной SRTM модели ЦМР (рис. 2) использовались для аппроксимации уровня затопления местности при планируемом повышении воды Чебоксарского гидроузла до отметки 68 м. При этом также был рассмотрен вариант использования защитных сооружений (дамбы), предполагаемых на карте затопления и подтопления Чебоксарского вдхр. проекта РусГидро (<http://www.bigpowernews.ru/news/document36588.phtml>).

Рис. 2. Мозаика тайлов ЦММ (а, в, г) и ЦМР (б) на территорию исследования с указанием изолиний, отображающих высоты точек местности. Синяя зона объединяет высоты точек местности 63–68 м, которые могут быть затоплены при повышении уровня воды Чебоксарской ГЭС до проектной отметки 68 м

В конечном итоге были получены два варианта векторных слоёв: 1) потенциальная площадь затопления территории РМЭ и ЧР при подъёме Чебоксарской ГЭС до отметки 68 м; 2) та же площадь затопления, но с учётом инженерных систем (дамбы) защиты населённых пунктов и территорий согласно проекту РусГидро (рис. 3, см. с. 218).

Для разработки карты наземного покрова была использована пошаговая неуправляемая классификация методом Isodata (от *англ.* Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique). Идентификация классов на вновь полученной тематической карте проводилась с использованием данных лесоустройства и полевых исследований в районе изыскания, проведённых ЦУДМЛ ПГТУ с 2012 по 2019 г. (рис. 4, см. с. 219) (Воробьёв и др., 2019). На основании этих данных в работе были выделены восемь тематических классов наземного (растительного) покрова, расположенных в районе предполагаемого затопления Чебоксарского вдхр. (табл. 1).

Рис. 3. Карта затопления территории РМЭ и ЧР при возможном подъёме Чебоксарской ГЭС до проектируемой отметки 68 м

Таблица 1. Тематические классы наземного (растительного) покрова территории предполагаемого затопления

Класс	Описание класса
1. Сосна	Древостой с преобладанием сосновых насаждений (<i>Pinus sylvestris</i>)
2. Берёза	Древостой с преобладанием берёзовых насаждений (<i>Betula pendula</i>)
3. Смешанные	Смешанные древостои (берёза, осина (<i>Populus tremula</i>), сосна, дуб (<i>Quercus robur</i>) и ольха (<i>Alnus glutinosa</i>))
4. Молодняки	Молодняки хвойных и лиственных пород, включая кустарниковую растительность
5. Трава	Травянистый покров, представленный многолетними травами
6. Открытые	Не покрытые растительностью (песчаный карьер, пляж, вырубка, прогалина, пустырь)
7. Вода	Водные объекты (болота, озёра)
8. Застройка	Населённые пункты

Сосна

Берёза

Смешанные

Молодняки

Трава

Открытые

Рис. 4. Примеры классов наземного (растительного) покрова потенциального затопления в РМЭ и ЧР

Для оценки точности картографирования в пакете ENVI были набраны 182 тестовых участка ROI (*англ.* Region of Interest). Оценка степени спектральной разделимости тестовых участков после проведения пошаговой классификации определялась методом Джеффриса – Матуситы (мера межкластерного расстояния). Значения статистической разделимости выбранных ROI могут варьировать от 0 до 2, а значение индекса выше 1,4 свидетельствует о приемлемой спектральной разделимости исследуемых классов наземного покрова (Chuviesco, 2016). Все полученные тематические классы были переведены в векторный формат на основе проекции СК-42.

Результаты исследований

Статистический анализ разделимости классов наземного (растительного) покрова для исследуемой местности, проведённый на основе методики Джеффриса — Матуситы, показал, что почти все парные значения оцениваемых тематических классов близки к 2, что свидетельствует о высокой степени различий между набранными ROI тестовых участков на спутниковых снимках Sentinel-2. Общая точность тематического картографирования (рис. 5) составила 0,88, каппа-статистика — 0,76.

Рис. 5. Тематическая карта наземного (растительного) покрова участка потенциального затопления с учётом защитных сооружений. Граница Чебоксарского вдхр. (голубой цвет) приведена для существующего уровня 63 м

Возможное поднятие уровня воды Чебоксарской ГЭС до отметки 68 м с одновременным созданием защитных сооружений может привести к дополнительному затоплению 47 691,2 га территории РМЭ и 10 358,3 га в ЧР. При этом в большей степени по площади (35 933 га) на всей территории (РМЭ и ЧР) будут утеряны лесные насаждения (сосновые — 6,8 %, берёзовые — 27,5 % и смешанные — 27,6 %), имеющие важное водоохранное и нерестоохранное значение для бассейна Чебоксарского вдхр. и р. Волги. Далее следуют молодняки/кустарниковая растительность (18,6 %) и водные объекты (10,5 %) (табл. 2). Республика Марий Эл может потерять дополнительно (первый подъём воды Чебоксарской ГЭС до уровня 63 м был в 1981 г.) в 4,5 раза больше земель, чем Чувашская Республика. Совокупные экологические потери, включающие исчезновение уникальных природных экосистем, нарушение и изменение окружающей среды, потерю среды обитания животного и растительного мира, могут быть ещё более существенными.

Сравнение полученных результатов возможных потерь земель РМЭ при потенциальном повышении Чебоксарской ГЭС до уровня 68 м показало некоторое отклонение

от данных исследования проф. П. Ф. Войтко (2009), который при оценке поднятия уровня Чебоксарского вдхр. взял за основу проектные данные ФГУП «Верхневолжское аэрогеодезическое предприятие». В частности, площадь затапливаемых лесных насаждений в нашем случае была больше на 17 235 га, а по открытым участкам, включая травянистую растительность, меньше на 2820 га (табл. 3).

Таблица 2. Распределение площади классов наземного (растительного) покрова на территории предполагаемого затопления

Класс	Марий Эл		Чувашия		Марий Эл		Чувашия	
	С защитными сооружениями				Без защитных сооружений			
	га	%	га	%	га	%	га	%
1. Сосна	3 497,9	7,3	442,64	4,3	3 636,4	6,8	1 087,3	8,1
2. Берёза	14 987,5	31,4	985,6	9,5	16 004,4	29,9	1 395,3	10,4
3. Смешанные	13 886,3	29,1	2132,7	20,6	15 566,4	29,1	3 641,6	27,1
4. Молодняки	7 462,2	15,6	3354,3	32,4	9 496,5	17,8	3 619,3	27,0
5. Трава	1 299,5	2,7	1661,9	16,0	1 898,5	3,6	1 708,7	12,7
6. Открытые	744,5	1,6	896,5	8,7	1 045,3	2,0	1 078	8,0
7. Вода	5 431,6	11,4	649,16	6,3	5 434,65	10,2	649,16	4,8
8. Застройка	381,7	0,8	235,5	2,3	381,7	0,7	235,5	1,8
Всего	47 691,2	100	10358,3	100	53 463,8	100	13 414,9	100

Таблица 3. Площади затапливаемых земель РМЭ между отметками 63 и 68 м по данным разных авторов

Авторы	Всего от общей площади (га/%)	В том числе (га)	
		Лесные насаждения	Луга и открытые участки
	Марий Эл		
Войтко П. Ф. (2009)	37 453/1,6	22 599	4864
Наше исследование	47 691/1,9	39 834	2044
РусГидро	35 500/1,5	30 300	3430
Чувашия			
Наше исследование	10 358/0,56	6 915	2558
РусГидро	9 500/0,52	3 800	3800

Наши данные по площади лесных насаждений Марий Эл и Чувашии выше расчётных, полученных РусГидро, на 9534 и 3115 га соответственно. В целом сравнение полученных результатов по площади затопления между отметками 63 и 68 м с данными РусГидро показало, что превышение площади по Марий Эл может составить 34 % (12191 га), по Чувашии — 9,1 % (858 га). Такое различие в площадях классов наземного (растительного) покрова может быть объяснено применением разных методик исследования, временных интервалов и эмпирического (исходного) материала.

Заключение

В работе показан пример комплексного прогнозного анализа потерь земель и растительного покрова в результате искусственного затопления при потенциальном поднятии уровня воды Чебоксарской ГЭС с отметки 63 м до проектной 68 м. Разработанная методика включает в себя

использование геоморфологических подходов с применением снимков Sentinel-2, индексного показателя NDWI, ЦМР (SRTM), данных полевых исследований и пошаговой классификации. Полученные данные могут быть использованы для лучшего понимания возможных рисков для природных экосистем и проектирования мероприятий по стабилизации общей экологической обстановки исследуемого региона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, MOST и NRF в рамках научного проекта № 19-55-80010\19.

Литература

1. Бузин В. А., Горошкова Н. И., Стриженко А. В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55–61.
2. Войтко П. Ф. Использование лесов Республики Марий Эл для строительства и эксплуатации искусственных водных объектов // Вестн. Марийского гос. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2009. № 3. С. 75–83.
3. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Полевщикова Ю. А., Лежнин С. А. Пространственно-временной анализ динамики лесного покрова в Среднем Поволжье по спутниковым данным: монография / под ред. Э. А. Курбанова. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. 200 с.
4. Жарко В. О., Барталев С. А., Егоров В. А. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
5. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2020. 266 с.
6. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Ретроспективный анализ потери растительного покрова в Республиках Марий Эл и Чувашия после затопления Чебоксарского водохранилища по данным Landsat/MSS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 127–137. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-127-137.
7. Курбатова И. Е. Космический мониторинг береговой зоны Краснодарского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 523–528.
8. Люшин 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.
9. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарья (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
10. Abarca-Del-Rio R., CrÉtaux J.-F., Berge-Nguyen M., Maisongrande P. Does Lake Titicaca still control the Lake Poopó system water levels? An investigation using satellite altimetry and MODIS data (2000–2009) // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3. P. 707–714. URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.667884>.
11. Chuvieco E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition. Boca Raton; L.; N. Y.: CRC Press Taylor and Francis, 2016. 468 p.
12. Cooley S. W., Smith L. C., Stepan L., Mascaro J. Tracking dynamic northern surface water changes with high-frequency planet CubeSat imagery // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 12. Art. No. 1306. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9121306>.
13. Di Baldassarre G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte L., Blöschl G. Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. Iss. 22. Art. No. L22402. URL: <https://doi.org/10.1029/2010GL045467>.
14. 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. No. 13. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12563>.
15. Jarihani A. A., Callow J. N., McVicar T. R., Van Niel T. G., Larsen J. R. Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments // J. Hydrology. 2015. V. 524. P. 489–506. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.049>.

16. 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. URL: <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1061-2>.
17. Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe // *J. Hydrology*. 2014. V. 519. P. 3634–3650. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>.
18. 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. URL: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
19. 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. URL: <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0413>.
20. Ricci G.F., Romano G., Leronni V., Gentile F. Effect of check dams on riparian vegetation cover: A multiscale approach based on field measurements and satellite images for Leaf Area Index assessment // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 657. No. 20. P. 827–838. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.081>.
21. Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini S. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 4173–4189. URL: <https://doi.org/10.3390/rs6054173>.
22. Shawky M., Moussa A., Hassan Q.K., El-Sheimy N. Pixel-based geometric assessment of channel networks/orders derived from Global Spaceborne Digital Elevation Models // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 3. Art. No. 235. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11030235>.
23. Shi W., Wang B., Tian Y. Accuracy analysis of Digital Elevation Model relating to spatial resolution and terrain slope by Bilinear Interpolation // *Mathematical Geosciences*. 2014. V. 46. P. 445–481. URL: <https://doi.org/10.1007/s11004-013-9508-8>.
24. Stanislawski L.V., Survila K., Wendel J., Liu Y., Battenfield B.P. An open source high-performance solution to extract surface water drainage networks from diverse terrain conditions // *Cartography and Geographic Information Science*. 2018. V. 45. No. 4. P. 319–328. URL: <https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1337524>.
25. Vaze J., Teng J., Spencer G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices // *Environmental Modelling and Software*. 2010. V. 25. P. 1086–1098. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.014>.

Assessment of vegetation cover flooding in the republics of Mari El and Chuvashia in case of Cheboksary Reservoir rise to a mark of 68 m with the use of remote sensing

O. N. Vorobiev, E. A. Kurbanov

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: vorobievon@volgatech.net

Construction of hydroelectric dams in river basins is an alternative option to generate “clean” energy, which is demanded in domestic and international markets. On the other hand, this type of projects negatively affects the riparian vegetation ecosystems. The paper evaluates potential loss of forest ecosystems along the Cheboksary Reservoir with the use of Sentinel-2 satellite imagery and DEM (Digital Elevation Model) in case of a possible rise of Cheboksary Dam’s water level from 63 m to the initially designed 68 m. The study area includes vegetation cover along the right and left banks of the Volga River, taking into account its bed’s width in the borders of the republics of Mari El and Chuvashia in 2020. We used Isodata unsupervised classification of satellite images for the assessment of land cover on the study area. Identification of 8 land (vegetation) cover classes on the thematic map was carried out on the basis of the available forest inventory and field research data, gathered in the study area in 2012–2019. Evaluation of the land cover classes by the Jeffreys–Matusita distance showed their high spectral separability. Overall accuracy of the 2020 thematic map was 0.88. The classification results of the possible flooded territory showed that forest stands (pine 6.8 %, birch 27.5 % and mixed deciduous 27.6 %) can be lost to a greater extent in terms of area. This is followed by young stand/shrubs

(18.6 %) and water bodies (10.5 %). In case Cheboksary Dam's water level rises to 68 m, Mari El may lose 4.5 times more lands than Chuvashia. The research results can be used for regional assessments (environmental, social and economic) of the consequences of a possible increase in the level of the Cheboksary Reservoir.

The reported study was funded by RFBR, MOST and NRF according to the research project No. 19-55-80010\19.

Keywords: Cheboksary Reservoir, forest ecosystems, Sentinel-2, DEM, NDWI, Isodata

Accepted: 02.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225

References

1. Buzin V.A., Goroshkova N.I., Strizhenok A.V., Maximum ICE-JAM water levels on the northern rivers of Russia under conditions of climate change and anthropogenic impact on the ice jamming process, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, Vol. 39, No. 12, pp. 823–827.
2. Voitko P.F., Use of Mari El republic forests for building and exploitation of artificial water objects, *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2009, No. 3, pp. 75–83 (in Russian).
3. Vorobiev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A., *Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po sputnikovym dannym* (Spatio-temporal analyses of forest cover dynamics in Middle Volga region on the base of satellite data), Kurbanov E.A. (ed.), Yoshkar-Ola: Volgatch, 2019, 200 p. (in Russian).
4. Zharko V.O., Bartalev S.A., Egorov V.A., Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote sensing in forestry), Yoshkar-Ola: PGU, 2020, 266 p. (in Russian).
6. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Retrospective analysis of vegetation cover loss in Republics of Mari El and Chuvashia after flooding of Cheboksarskaya dam from Landsat/MSS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 127–137 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-127-137.
7. Kurbatova I.E., Space monitoring of the coastal zone of the Krasnodar reservoir, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, Issue 5, pp. 523–528 (in Russian).
8. Lyushvin P.V., Zyryanov V.N., Egorov S.N., Kukharskii A.V., Polonskii V.F., Korshenko A.N., Lobov A.L., Space monitoring of the coastal zone of the Krasnodar reservoir impact of peak releases from the Volgograd hydrological power on the ecology of the North-West Caspian, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 2, pp. 121–129 (in Russian).
9. Terekhov A.G., Abayev N.N., Lagutin E.I., Satellite monitoring of the Sardoba Reservoir in Syr Darya River basin (Uzbekistan) before and after a dam collapses on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 255–260 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
10. Abarca-Del-Rio R., CrÉtaux J.-F., Berge-Nguyen M., Maisongrande P., Does Lake Titicaca still control the Lake Poopó system water levels? An investigation using satellite altimetry and MODIS data (2000–2009), *Remote Sensing Letters*, 2012, Vol. 3, pp. 707–714, available at: <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.667884>.
11. Chuvieco E., *Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach, Second Edition*, Boca Raton; London; New York: CRC Press Taylor and Francis, 2016, 468 p.
12. Cooley S.W., Smith L.C., Stepan L., Mascaro J., Tracking dynamic northern surface water changes with high-frequency planet CubeSat imagery, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 12, Art. No. 1306, available at: <https://doi.org/10.3390/rs9121306>.
13. Di Baldassarre G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte L., Blöschl G., Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, Issue 22, Art. No. L22402, available at: <https://doi.org/10.1029/2010GL045467>.
14. 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, No. 13, pp. 1–15, available at: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12563>.

15. Jarihani A. A., Callow J. N., McVicar T. R., Van Niel T. G., Larsen J. R., Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments, *J. Hydrology*, 2015, Vol. 524, pp. 489–506, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.049>.
16. 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, available at: <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1061-2>.
17. Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T. R., Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe, *J. Hydrology*, 2014, Vol. 519, pp. 3634–3650, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>.
18. 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, available at: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
19. 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, available at: <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0413>.
20. Ricci G. F., Romano G., Leronni V., Gentile F., Effect of check dams on riparian vegetation cover: A multiscale approach based on field measurements and satellite images for Leaf Area Index assessment, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 657, No. 20, pp. 827–838, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.081>.
21. Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini S., Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 4173–4189, available at: <https://doi.org/10.3390/rs6054173>.
22. Shawky M., Moussa A., Hassan Q. K., El-Sheimy N., Pixel-based geometric assessment of channel networks/orders derived from Global Spaceborne Digital Elevation Models, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 3, Art. No. 235, available at: <https://doi.org/10.3390/rs11030235>.
23. Shi W., Wang B., Tian Y., Accuracy analysis of Digital Elevation Model relating to spatial resolution and terrain slope by Bilinear Interpolation, *Mathematical Geosciences*, 2014, Vol. 46, pp. 445–481, available at: <https://doi.org/10.1007/s11004-013-9508-8>.
24. Stanislawski L. V., Survila K., Wendel J., Liu Y., Buttenfield B. P., An open source high-performance solution to extract surface water drainage networks from diverse terrain conditions, *Cartography and Geographic Information Science*, 2018, Vol. 45, No. 4, pp. 319–328, available at: <https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1337524>.
25. Vaze J., Teng J., Spencer G., Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices, *Environmental Modelling and Software*, 2010, Vol. 25, pp. 1086–1098, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.014>.