

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ СУБАКВАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЗЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2021 г. Н. М. Легачева^а, *, А. А. Шехирев^а

^а Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

*E-mail: legacheva2015@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

Проведен геоинформационный анализ изменения береговой линии и площади субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища с 1999 по 2016 гг. Проанализирован процесс зарастания субаквальных ландшафтов участков впадения в водохранилище рек бассейна Зеи. Использованы методы дистанционного зондирования Земли, применена обработка космических снимков с использованием индексов MNDWI и NDVI, составлен комплекс карт территории в программе ArcGIS, описано рациональное использование субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища. При анализе составленных карт на выбранных участках выявлено, что на периодически затопляемой территории зафиксирована разреженная растительность и низкая продуктивность фотосинтетически активной биомассы на пойменных почвах вследствие отложения осадков после катастрофического наводнения 2013 г.

Ключевые слова: Зейское водохранилище, субаквальные ландшафты, космические снимки, водный индекс MNDWI, вегетационный индекс NDVI

10.31857/S0205961421020044

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое распространение для исследования зон прибрежных (субаквальных) территорий получил спутниковый мониторинг (Кузмина и др., 2006; Бондур, 2010). Субаквальный ландшафт представляет собой прибрежную территорию вдоль береговой линии в пойме реки, озера или водохранилища, развивающуюся в условиях периодического затопления пресными водами. Спутниковый мониторинг широко используется для изучения гидрологических объектов и наводнений с ними связанных. Одним из основных инструментов дистанционного зондирования Земли в определении последствий наводнений является расчет водного и вегетационного индекса (Погорелов и др., 2017).

Зейское водохранилище – крупнейший искусственный водоем на Дальнем Востоке России (Амурская область) – расположено в верхнем течении р. Зеи. Водохранилище имеет комплексное значение. Во-первых, служит для гидроэнергетических целей, во-вторых, контролирует противопаводковую ситуацию. Одной из главных его функций является нивелирование пиков подъема уровня воды, вызванных муссонными дождями с целью ликвидации угроз наводнения. Годовое количество осадков в месте нахождения водохранилища достигает более 1000 мм. Для данного ре-

гиона характерен летний максимум осадков в объеме 70% от годовой нормы. Водный режим водохранилища и его регулирование существенно влияет на использование прибрежных территорий в агропромышленном комплексе. В начале XXI века катастрофические наводнения в Амурской области зафиксированы в 2007 и 2013 гг. (Курганова и др., 2014). Так, в 2007 г. было затоплено более 100 населенных пунктов, а также дороги, линии связи, сельскохозяйственные угодья. При повышении уровня воды до отметок средней поймы затоплялось около 70–80% лугов и пастбищ (Цой, 2012).

В силу значительной протяженности береговой линии Зейского водохранилища осуществлять наземный мониторинг трансформации прилегающих к нему прибрежных территорий чрезвычайно трудоемко (Воротникова и др., 2016). Это задача с большим объемом геодезических измерений, что трудновыполнимо и малоэффективно. Традиционные подходы, основанные на наземном сборе данных, не позволяют достаточно оперативно решать задачи экологического мониторинга, инвентаризации и картографирования перспективных сельскохозяйственных угодий. Вследствие чего метод дистанционного зондирования представляется наиболее оптимальным для мониторинга пространственно-вре-

Таблица 1. Сведения об использованных спутниковых снимков

№ п/п	Спутник	Каналы		Разрешение, м	Дата
		MNDWI	NDVI		
1	Landsat-7	2 и 7	3–4	30	06.08.1999
2	Landsat-8	3 и 6	4–5	30	20.08.2013
3	Landsat-8	3 и 6	4–5	30	28.08.2016

менных изменений затопляемых территорий. Использование спутниковых данных позволяет существенно упростить сбор и обработку данных (Фролов, 2020). Для обработки больших потоков спутниковых данных применяют специальные методы (Бондур, 2014; Бондур, Старченков, 2001).

Для максимально эффективного использования затопляемых субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища в разных отраслях сельского хозяйства Амурской области необходимо проанализировать изменения площади участков и показателя растительной продуктивности на них посредством спутникового мониторинга. Отметим, что при данном мониторинге затопляемых территорий водохранилища, находящегося в муссонном климате, важно использовать качественные космические снимки определенного времени года.

Цель настоящей работы – определить изменения площади затопления Зейского водохранилища по данным спутникового мониторинга до и после катастрофического наводнения 2013 г., а

также оценить интенсивность зарастания прибрежных субаквальных ландшафтов. В задачи исследования входят обработка спутниковых снимков территории, расчет водного индекса, а также анализ многолетних изменений площади водохранилища, процесса зарастания и заиления субаквальных ландшафтов по данным вегетационного индекса.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследовании рассмотрены затопляемые субаквальные ландшафты водохранилища и плесов рек Зеи и Уркана. Реки, впадающие в водохранилище, отличаются наличием постоянного стока, высокими скоростями течения, тесной связью с наземными экосистемами и исключительным разнообразием биотопов на сравнительно небольшом пространстве. В связи с широким распространением многолетней мерзлоты для всей территории исследования характерно значительное распространение поверхностной заболоченности (Корниенко, 2011). Основную опасность для региона представляют наводнения, увеличивающие площади субаквальных ландшафтов в регионе.

Измерение площади затопления прибрежных субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища по данным дистанционного зондирования проводилось с использованием разновременных многоспектральных спутниковых снимков Landsat за 1999–2016 гг. Сведения о использованных снимках Landsat приведены в табл. 1. В исследовании использованы космические снимки с облачностью не более 30% (рис. 1). Создание картографического материала и его анализ проводились с помощью программного комплекса ArcGIS. Обработка снимков выполнена в программе ArcMap.

Автоматизированное распознавание и классификация продуктивности проведены на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI; классификация объектов “вода–не вода” с использованием модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI. Индекс MNDWI рассчитан по данным спектральных каналов 3 и 6 снимков с Landsat-8. Расчет NDVI произведен по данным 4 и 5 спектральных каналов Landsat-8.

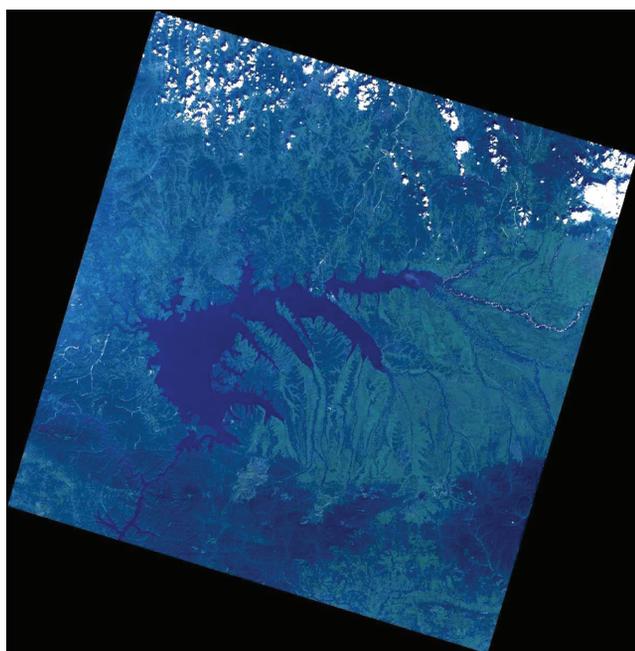


Рис. 1. Космический снимок Зейского водохранилища с Landsat-8: данные от 20.08.2013.

Таблица 2. Индексы и формулы для их расчета

Индекс	Формула расчета
Модифицированный нормализованный разностный	$MNDWI = (GREEN - SWIR2)/(GREEN + SWIR2)$
Нормализованный разностный	$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$

Примечание. GREEN – зеленый канал (0.525–0.600 мкм); SWIR2 ближний инфракрасный канал (1.56–1.66 мкм); RED – красный канал (0.64–0.72 мкм); NIR – инфракрасный канал (0.77–0.88 мкм)

Таблица 3. Сводная таблица результатов классификации по вегетационному индексу на основе Landsat-8

Класс	Объект	NDVI
1	Водные объекты	–1–0
2	Растительность скудная (песок, камни)	0–0.2
3	Растительность разреженная (кустарники)	0.2–0.3
4	Растительность низкой продуктивности (пастбища)	0.3–0.4
5	Растительность высокой продуктивности (лес)	0.4–1

Индекс MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) распознает разнообразие водные поверхности. Водный индекс эффективно использовать для классификации на снимках поверхности “вода–не вода”, кроме этого индекс эффективно подавляет и/или удаляет шумовые эффекты с поверхности суши. Данный индекс необходим для обнаружения поверхностных вод среди заболоченной местности и определения степени покрытия участка поверхностными водами. Индекс использовался в исследовании на раннем этапе для более точного дешифрирования местности. Посредством использования индекса MNDWI выделен контур самого водохранилища и речная сеть, питающая его.

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является распространенным количественным показателем фотосинтетически активной биомассы и отражает степень заиления и зарастания растительностью затопляемого участка (Бондур, Воробьев, 2015). NDVI прост в вычислении, имеет широкий динамический диапазон, умеренно чувствителен к изменениям атмосферного и почвенного фонов при дистанционной оценке зеленой фитомассы (Бондур, Воробьев, 2015; Гопп и др., 2019). Формулы расчета водного и вегетативного индекса приведены в табл. 2.

NDVI достоверно распознает растительные, почвенные и водные объекты (Ichii et al., 1990). Для определения степени зарастания применена классификация в пять классов в интервале значений от –1 до +1, где значение от 0 до –1 – открытые водные поверхности (табл. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из анализа данных по площадям затопления субаквальных ландшафтов Зейского водохрани-

лища, приведенных на рис. 2–4, которые получены за 1999, 2013, 2016 гг., видно, что минимальная площадь затопления и, следовательно, максимальная площадь субаквальных ландшафтов наблюдалась в 1999 г. (2110 км²), а в августе 2013 г. во время катастрофического наводнения площадь затопления была максимальна (2506.3 км²). После 2013 г. наблюдается снижение уровня водной поверхности, обнажение субаквальных ландшафтов на 33 км² и повышение уровня продуктивности биомассы на исследуемой территории. Максимальных значений площади прибрежных субаквальных ландшафтов в 2016 г. по сравнению к 2013 г. достигли на востоке водохранилища на участках плесов р. Зейя (рис. 2, а) и р. Уркан (рис. 2, б).

На рис. 2 видно, что площадь зеркала водохранилища при нормальном подпорном уровне в 2013 г. увеличилась по сравнению с 1999 г. максимально, а субаквальные ландшафты полностью затоплены. Также наблюдается подъем уровня воды во впадающих в водохранилище реках, что связано с интенсивными муссонными осадками, вызвавшими катастрофическое наводнение 2013 г.

С помощью водного индекса MNDWI выделены контуры водохранилища в период минимального нормального подпорного уровня воды в августе 1999 г., которые в дальнейшем использовались для нахождения площади субаквальных ландшафтов наложением контура береговой линии водохранилища 1999 г. на снимок с береговой линией 2013 г. (рис. 3). Таким образом, были получены данные о максимальной площади субаквальных периодически затопляемых ландшафтах береговой линии Зейского водохранилища, которые составили 396.3 км². К 2016 г. уровень зеркала водохранилища снизился, обнажив 33 км² затопленных территорий. Для изучения степени зарас-

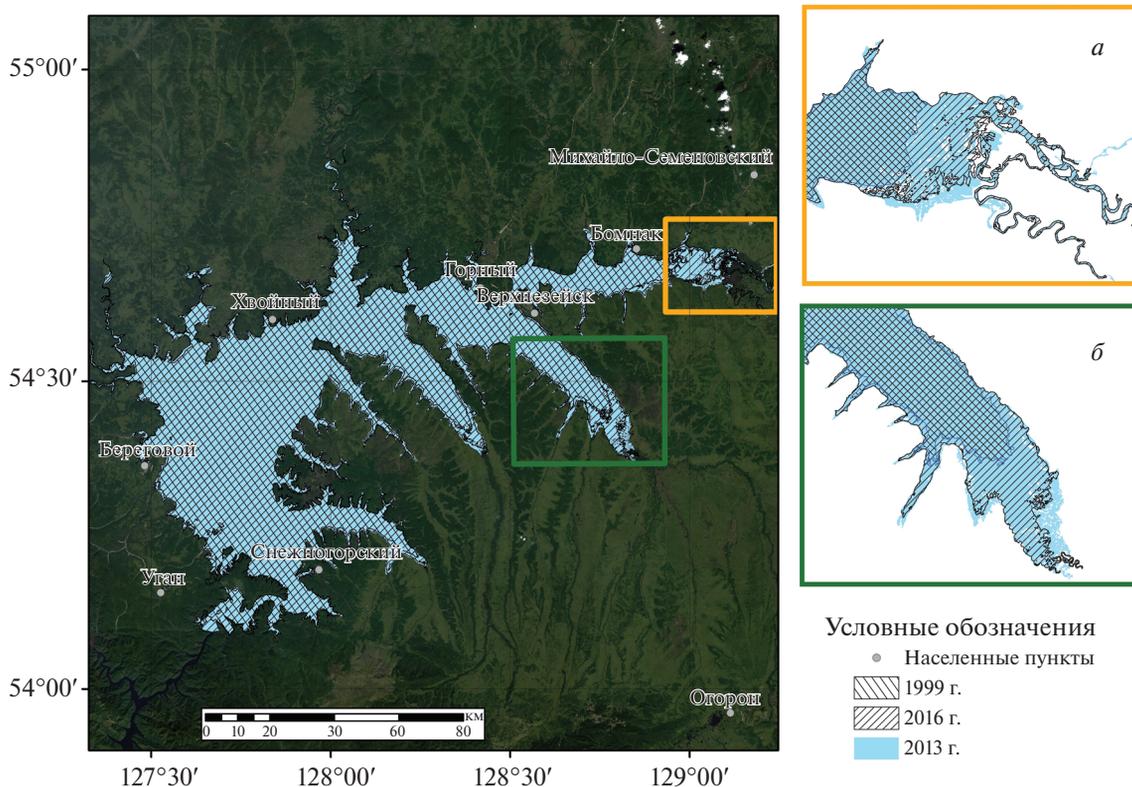


Рис. 2. Изменение площади прибрежных территорий субкавальных ландшафтов Зейского водохранилища с 1999 по 2016 гг. по результатам дешифрирования космических снимков Landsat с использованием MNDWI.

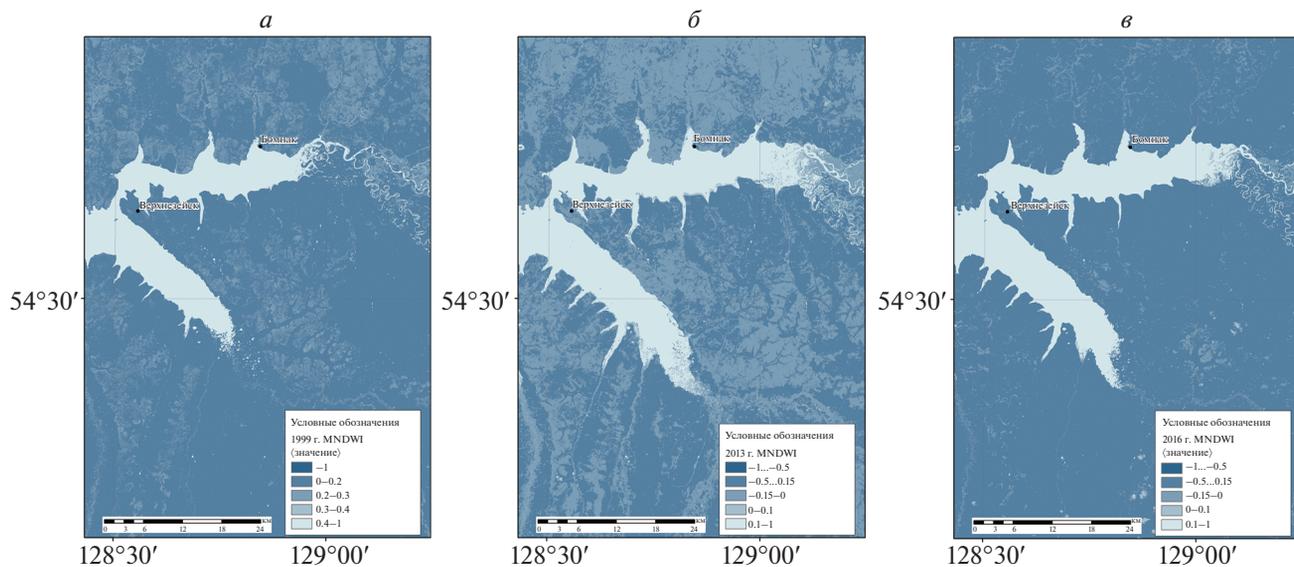


Рис. 3. Ключевой участок Зейского водохранилища с рассчитанным водным индексом MNDWI на даты съемки: *а* – 6 августа 1999 г.; *б* – 20 августа 2013 г.; *в* – 28 августа 2016 г.

тания ключевых участков был применен вегетационный индекс NDVI (рис. 4).

На рис. 4 представлены карты распределения фотосинтетической активности биомассы терри-

тории исследуемого ключевого участка Зейского водохранилища за 1999–2016 гг. На карте, построенной по данным 2013 г., виден существенный разлив Зейского водохранилища. По сравне-

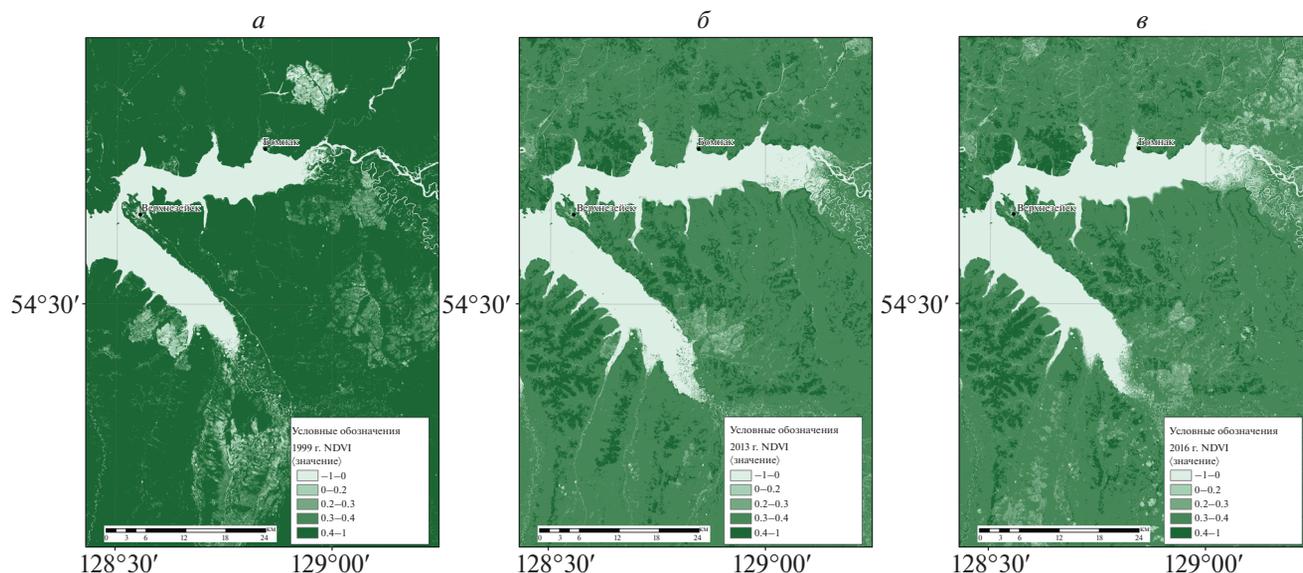


Рис. 4. Распределение фотосинтетически активной биомассы Зейского водохранилища по данным нормализованного разностного индекса растительности NDVI на даты съемки: *а* – 6 августа 1999 г.; *б* – 20 августа 2013 г.; *в* – 28 августа 2016 г.

нию с 1999 г., заметен более высокий вегетационный индекс NDVI на субаквальных ландшафтах поймы р. Зея, что может свидетельствовать о приросте фотосинтетически активной биомассы на данной территории. Показатель вегетационного индекса NDVI изменялся от 0 до 0.4, выявляя ареалы со скудной, разреженной, низкопродуктивной и высокопродуктивной растительностью.

Уменьшение площади затопления Зейского водохранилища с 2506.3 км² в 2013 г. до 2473.3 км² в 2016 г. привело к постепенному зарастанию субаквальных ландшафтов, что хорошо отражает показатель вегетационного индекса NDVI за 2016 г. (рис. 4, *в*). На затопленных в 2013 г. территориях к 2016 г. наблюдалось увеличение биомассы, а следовательно, и пространственная дифференциация вегетационного индекса NDVI. Это свидетельствует о наличии на субаквальных ландшафтах растительности с различной степенью продуктивности, которая в короткий срок набрала значительную биомассу, необходимую для использования земель, например, под пастбища.

Площадь зеркала водохранилища при нормальном подпорном уровне в 2016 г. являлась средним показателем между 1999 и 2013 гг. После крупнейшего наводнения 2013 г. площадь зеркала водохранилища уменьшилась, а площадь субаквальных ландшафтов соответственно увеличилась 33 км², что составляет порядка 8.3% от прибрежных периодически затопляемых ландшафтов Зейского водохранилища в 1999 г.

ВЫВОДЫ

1. Применение данных дистанционного зондирования Земли для решения задач мониторинга – перспективное направление, преимуществами которого являются оперативность и достоверность получаемой информации, ее объективность и независимость в оценке состояния и изменений исследуемых прибрежных субаквальных ландшафтов. Спутниковый мониторинг имеет практическую и экономическую целесообразность при условии использования автоматизированных методов дешифрирования, базирующихся на спектрально-информационных свойствах в зависимости от качественно-количественных показателей земного покрова и их сезонной изменчивости.

2. На основе массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением исследована растительная продуктивность субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища. По распределению водного индекса выделены контуры береговой линии водохранилища за 1999, 2013 и 2016 гг. На основе анализа распределения вегетационного индекса в пределах ключевого участка определена степень фотосинтетически активной биомассы субаквальных ландшафтов.

3. Показано влияние муссонных дождей и катастрофических наводнений на существенную пространственно-временную динамику фотосинтетически активной биомассы и, как следствие, возможность использования затопляемых территорий. Такие земли, как правило, не используются, но при кратковременном затоплении на них образуются плодородные почвы,

вследствие отложения осадка, богатого органическим веществом. Такие территории можно использовать в дальнейшем для выращивания сельскохозяйственных культур или пастбищ для уменьшения сельскохозяйственной нагрузки на другие территории (Кальная, 2014).

4. Эксплуатация водохранилища приводит к значительной трансформации окружающей природной среды, возникновению различных геоэкологических ситуаций, требующих помимо природоохранных мероприятий всестороннего изучения и мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
<https://doi.org/10.7868/S0205961414010035>
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415040028>
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Воронникова Н.В., Зубенкова М.А.* Геоинформационное картографирование антропогенной нарушенности природной среды промышленными и техногенными процессами на примере Зейского водохранилища Амурской области // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы II Международной научной конференции (г. Москва, июнь 2016 г.). Москва: Буки-Веди, 2016. С. 10–12.
- Гонн Н.В., Савенков О.А., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Смирнов А.В.* Использование NDVI в цифровом картографировании содержания фосфора в почвах и оценка обеспеченности им растений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 65–73.
- Кальная О.И.* Особенности функционирования Шагонарского плеса Саяно-Шушенского водохранилища и его влияние на экологическое состояние окружающей среды // Фундаментальные исследования. 2014. № 12. Ч. 7. С. 1452–1462.
- Корниенко С.Г.* Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.
- Кузьмина Ж.В., Новикова Н.М., Подольский С.А.* Использование экотонной концепции для обоснования водоохранных зон прибрежных территорий // Институт водных проблем РАН, 2006. С. 79–83.
- Курганова О.П., Явкина Е.Н., Ситникова Г.В.* Обзор гидрологических особенностей наводнений в амурской области для выработки комплекса санитарно-противоэпидемических мероприятий по минимизации социальных последствий // Проблемы особо опасных инфекций. 2014. № 1. С. 29–32.
- Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С.* Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник – Geographical bulletin. 2017. № 1(40). С. 130–137.
<https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-130-137>
- Фролов А.А.* Геоинформационно-картографический анализ изменчивости геосистем Юго-Западного Забайкалья // Геодезия и картография. 2020. № 2. Т. 81. С. 7–17.
- Цой О.М.* Математическое моделирование чрезвычайных ситуаций природного характера на юге Дальнего Востока. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 192 с.
- Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y.* Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 // International J. Remote Sensing. Т. 23. V. 18. P. 3873–3878.
<https://doi.org/10.1080/01431160110119416>

Satellite Monitoring: The Changes of Subaqueous Landscapes of the Zeya Reservoir

N. M. Legacheva¹ and A. A. Shehirev¹

¹Altay State University, Barnaul, Russia

Geo-information analysis of the coastline and area changes of subaqueous landscapes of the Zeya Reservoir was carried out from 1999 till 2016. The process of overgrowth subaqueous landscapes of confluences with rivers' reservoir of the Zeya basin was analysed. Methods of remote sensing of the Earth were used, the processing of space images with the using indexes MNDWI and NDVI was applied, the set of a territory maps in the program ArcGIS was made up. The rational usage of subaqueous landscapes of the Zeya Reservoir was described. The analysis of the compiled maps on the selected areas revealed that on the periodically flooded territory thinned vegetation and low productivity of photosynthetically active biomass was committed on floodplain soils due to sedimentation after the disastrous flood in 2013.

Keywords: the Zeya Reservoir, subaqueous landscapes, space images, water index MNDWI, vegetation index NDVI

REFERENCES

- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography.* 2001. № 3. P. 118–143 (In Russian).
- Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054
- Frolov A.A.* Geoinformacionno-kartograficheskij analiz izmenchivosti geosistem Yugo-Zapadnogo Zabajkal'ya // *Geodeziya i kartografiya.* 2020. № 2. V. 81. P. 7–17 (In Russian).
- Gopp N.V., Savenkov O.A., Nechaeva T.V., Smirnova N.V., Smirnov A.V.* Ispol'zovanie NDVI v cifrovom kartografirovanii sodержaniya fosfora v pochvah i ocenka obespechenosti im rastenij // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2019. № 2. P. 65–73 (In Russian).
- Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y.* Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 // *International J. Remote Sensing.* T. 23. V. 18. P. 3873–3878. DOI: 10.1080/01431160110119416
- Kal'naya O.I.* Osobennosti funkcionirovaniya Shagonarskogo plyosa Sayano-Shushenskogo vodokhranilishha i ego vliyanie na ekologicheskoe sostoyanie okruzhayushhej sredy // *Fundamental'nye issledovaniya.* 2014. № 12. Ch. 7. P. 1452–1462 (In Russian).
- Kornienko S.G.* Ocenka transformacij prirodnykh landshaftov Tazovskogo poluoostrova po dannym kosmicheskoy s'ymki // *Geografiya i prirodnye resursy.* 2011. № 1. P. 67–73 (In Russian).
- Kurganova O.P., Yavkina E.N., Sitnikova G.V.* Obzor gidrologicheskikh osobennostej navodnenij v amurskoj oblasti dlya vyrobotki kompleksa sanitarno-protivoepidemicheskikh meropriyatij po minimizacii social'nyh posledstvij // *Problemy osobo opasnyh infekcij.* 2014. № 1. P. 29–32.
- Kuz'mina Zh.V., Novikova N.M., Podol'skij S.A.* Ispol'zovanie ekotonnoj koncepczii dlya obosnovaniya vodookhrannykh zon pribrezhnykh territorij / Zh.V. Kuz'mina // *Institut vodnykh problem Rossijskoj akademii nauk.* 2006. P. 79–83 (In Russian).
- Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S.* Sputnikovyy monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishha // *Geograficheskij vestnik – Geographical bulletin.* 2017. № 1 (40). P. 130–137 (In Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137
- Tsoy O.M.* Matematicheskoe modelirovanie chrezvychajnykh situaczij prirodnogo kharaktera na yuge Dal'nego Vostoka. M.: FGBU VNII GOChS (FCz), 2012. 192 p. (In Russian).
- Vorotnikova N.V., Zubenkova M.A.* Geoinformacionnoe kartografirovanie antropogennoj narushennosti prirodnoj sredy promyshlennymi i tekhnogennymi processami na primere Zejskogo vodokhranilishha Amurskoj oblasti // *Nauki o Zemle: vchera, segodnya, zavtra: materialy II Mezhdunarodnoj nauchnoj konferenczii (g. Moskva, iyun' 2016 g.).* Moskva: Buki-Vedi, 2016. P. 10–12 (In Russian).