

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗАТОПЛЕНИЙ НА ТРУБОПРОВОДАХ**

*Вячеслав Анатольевич Мелкий*

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, e-mail: vamelkiy@mail.ru

*Даниил Валентинович Долгополов*

АО «СпейсИнфо Геоматикс», 127490, Россия, г. Москва, ул. Декабристов, владение 51, кандидат технических наук, технический директор, тел. (905)714-13-77, e-mail: daniil.dolgopolov@gmail.com

*Алексей Александрович Верхотуров*

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, e-mail: ussr-91@mail.ru

Целью настоящего исследования является изучение возможностей практического использования многозональных космических изображений при осуществлении геотехнического мониторинга объектов трубопроводного транспорта во время затоплений.

Для мониторинга протяженных объектов, анализа большого количества данных дистанционного зондирования Земли требуются современные методы и подходы. Такими методами могут являться методы изучения спектральных характеристик поверхности Земли, полученных с использованием космических систем и собранных в базах, данных специализированных ГИС.

Использование специальных индексов и технологий автоматизированного дешифрирования многозональных космических снимков позволяет получать и анализировать информацию о затоплениях объектов трубопроводных систем. Исследования показали, что данные спутника Sentinel-2 дают возможность достаточно точно определять паводковую обстановку по изображению, индексированному с помощью Normalized Difference Water Index (NDWI) и выделить области и объекты мониторинга, затопленные водой.

**Ключевые слова:** многозональные космические изображения, ГИС-технологии, трубопроводная система, дистанционное зондирование Земли, затопление, мониторинг, NDWI-индекс.

## **POSSIBILITIES OF USING SATELLITE IMAGES AND GIS TECHNOLOGIES FOR MONITORING INUNDATION OF PIPELINE SYSTEMS**

*Vyacheslav A. Melkiy*

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazards, e-mail: vamelkiy@mail.ru

*Daniil V. Dolgopolov*

JSC SpaceInfo Geomatics, 51, Dekabristov St., Moscow, 127490, Russia, Ph. D., Technical Director, phone: (905)714-13-77, e-mail: daniil.dolgopolov@gmail.com

*Alexey A. Verkhoturov*

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Center of Collective Use, e-mail: ussr-91@mail.ru

The purpose of this research is the study of possibilities of practical use of multi-zone satellite images for implementation of geotechnical monitoring of pipeline transport facilities during floodings.

Modern methods and approaches are required for monitoring extended objects and analyzing large amount of remote sensing data. Such methods can be applied for studying of spectral characteristics of the Earth's surface obtained using space systems, collected in databases using geoinformation technologies (GIS).

Use of special indexes and technologies for automated interpretation of multi-zone satellite images allows obtaining and analyzing information about state of pipeline systems at time of flooding. Research showed that Sentinel-2 satellite data makes it possible for fairly correctly determine of flood situation by image indexed with using of Normalized Difference Water Index (NDWI) and highlight areas and objects flooded of water.

**Key words:** multi-zone space images, GIS technologies, pipeline system, remote sensing of the Earth, spectral characteristics, monitoring, NDWI.

### ***Введение***

Задача оперативного определения зоны затопления рек во время половодья и паводков является одной из наиболее важных в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов (МТ).

Материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) могут быть использованы:

- при контроле уровня воды на переходах МТ через водную преграду.
- для оценки рисков затопления объектов МТ и разработки предупреждающих мероприятий;
- для оценки возможности проведения плановых и ремонтных работ;
- для планирования маршрутов и оценки мест возможного подъезда к объектам;
- при анализе возможных последствий в случае аварии и др.

### ***Методы и материалы***

При мониторинге паводковой обстановки в коридорах трассы магистральных трубопроводов интерес представляют многозональные изображения среднего и высокого пространственного разрешения (от 30 до 1 м/пикс) [1]. Современное состояние дистанционного зондирования позволяет проводить регулярную съемку земной поверхности и получать многозональные изображения с необходимой периодичностью и разрешением.

Sentinel-2 – спутники ДЗЗ Европейского космического агентства (ЕКА), созданные в рамках проекта Copernicus [2]. Спутники предназначены для глобального мониторинга окружающей среды и безопасности: мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, прогнозирования ситуации при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Для выявления водных объектов по многозональным космическим изображениям широко используются следующие индексы: NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI, AWEI [3–6].

### *Результаты*

Например, данные космического аппарата Sentinel-2 могут быть использованы при наблюдении за паводковой обстановкой, получения индексного изображения (NDWI) и автоматического определения области затопленной водой для дальнейшего анализа затопления объектов МТ и инфраструктуры (рис. 1).

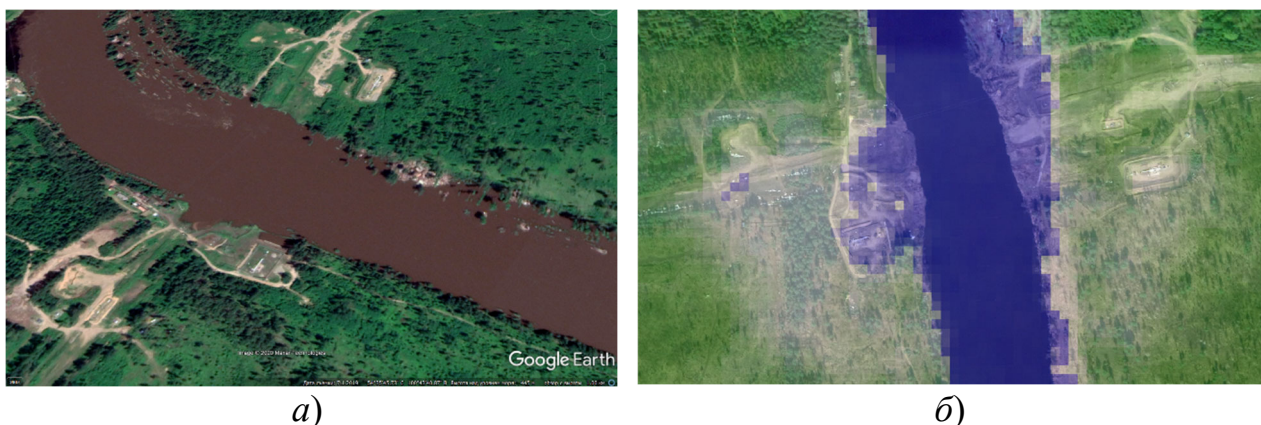


Рис. 1. Подводный переход через р. Ия в районе г. Тулун, Иркутская область (01.07.2019 г.)

а) – в программном обеспечении Google Earth (видимый диапазон); б) – спектральное индексное изображение NDWI, полученный по данным космического аппарата Sentinel-2

Индекс нормированной разности вод (NDWI) рассчитывается на основе данных каналов ближнего инфракрасного диапазона (БЛИК или NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR), где вода имеет положительное значение.

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), \quad (1)$$

где: NIR – ближний ИК диапазон (длина волны 0,841–0,876 нм);

SWIR – коротковолновый ИК диапазон (длина волны 1,628–1,652 нм).

Для исследования были использованы спутниковые снимки Sentinel-2 за июнь и июль 2019 г. (период наводнения) на территорию прохождения магистрального трубопровода в районе г. Тулун, включая подводный переход через р. Ия. (рис. 2). Анализ снимков с использованием индекса NDWI показал, что даже снимки среднего пространственного разрешения (20 м/пикс) позволяют достаточно точно оценить масштабы затопления объектов инфраструктуры трубопровода.

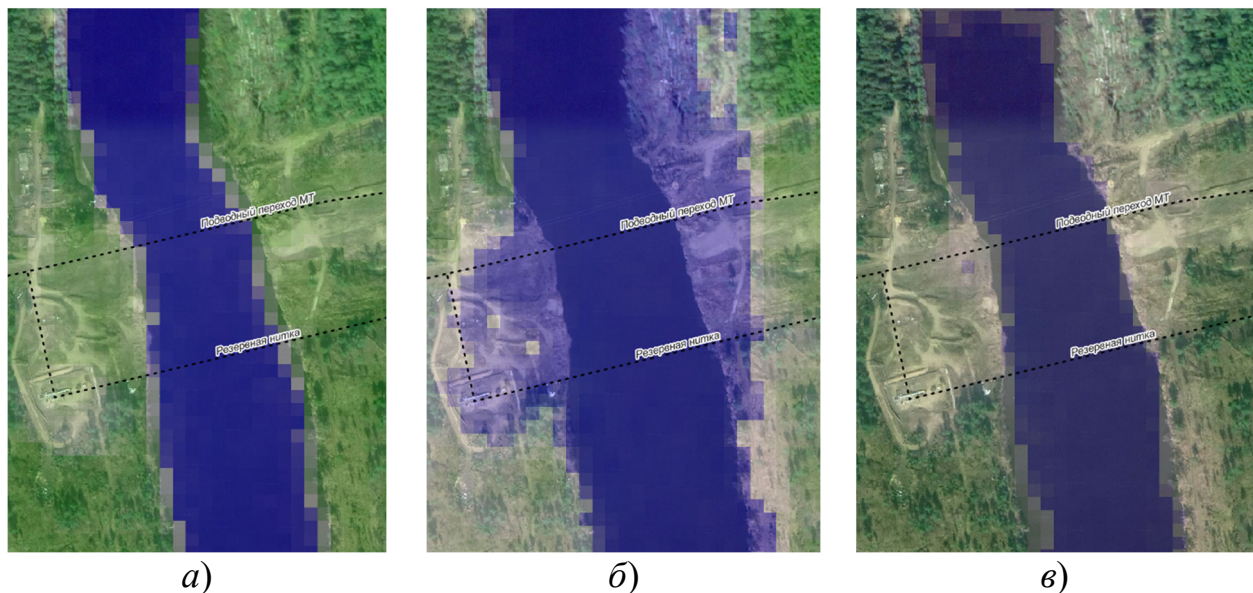


Рис.2. Спектральное индексное изображение NDWI на территорию подводного переход МТ через р. Ия в районе г. Тулун, Иркутская область  
 а) – состояние местности на 19 июня 2019 г.; б) – состояние местности на 01 июля 2019 г.; в) – состояние местности на 04 июля 2019 г.

### Обсуждение

Затопления и переформирование русла реки происходит при паводках, при высоком уровне воды и высоких скоростях течения. Поскольку изыскательские работы в период паводков не проводятся, а мониторинг возможен только дистанционный, то целесообразно воспользоваться данными ДЗЗ. Выявление истинного положения вещей, необходимое для анализа состояния трубопроводных систем и их инфраструктуры на труднодоступных территориях при затоплениях, невозможно без мониторинга ситуации с применением спутниковой информации [7, 8]. Рассмотренные в статье технологии позволяют определять ситуацию, сложившуюся в зоне затопления. Космические снимки можно использовать для мониторинга паводковой обстановки в любых системах, которые могут быть адаптированы для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводных систем. Объединение информации ДЗЗ с данными гидрометеорологических наблюдений позволит создать систему для решения многих задач по обеспечению безопасности. Прообразом такой системы могут послужить европейская и глобальная системы информирования о наводнениях.

Европейская комиссия (ЕК) в 2002 г. получила несогласованную информацию из различных источников иногда невысокого качества о возможных наводнениях на реках Эльба и Дунай. Возникли определенные трудности с планированием и организацией аварийно-восстановительных работ. Вследствие этих событий ЕК инициировала разработку Европейской системы информирования о наводнениях (EFAS) для усиления готовности к наводнениям в Европе [9]. Разработка и реализация системы были профинансированы Европейским парламентом, а также Правительствами Германии, Чехии, Австрии, Венгрии и Словакии.



Цель EFAS заключается в обеспечении информацией и составлении вероятностных прогнозов перед началом крупных наводнений, а также моделирование сценариев затоплений и рекомендаций по ликвидации последствий в соответствии с вариантами развития событий.

EFAS тестировалась в режиме реального времени в период с 2005 по 2010 годы, а с 2012 года работает в полном объеме при Службе управления чрезвычайными ситуациями Коперника (Copernicus Emergency Management Service – CEMS).

Прогнозы EFAS составляются с использованием натуральных и спутниковых данных, а также гидрометеорологических моделей и направлены на информирование пользователей о предстоящих наводнениях. На карте отображаются реки, на которых возможны наводнения и величина подъема уровня воды (рис. 3). EFAS обеспечивает поток информации раннего предупреждения за 10 дней до события. Система включает множество различных продуктов: мониторинг наводнений, прогнозы вероятности наводнения, последствия наводнений.

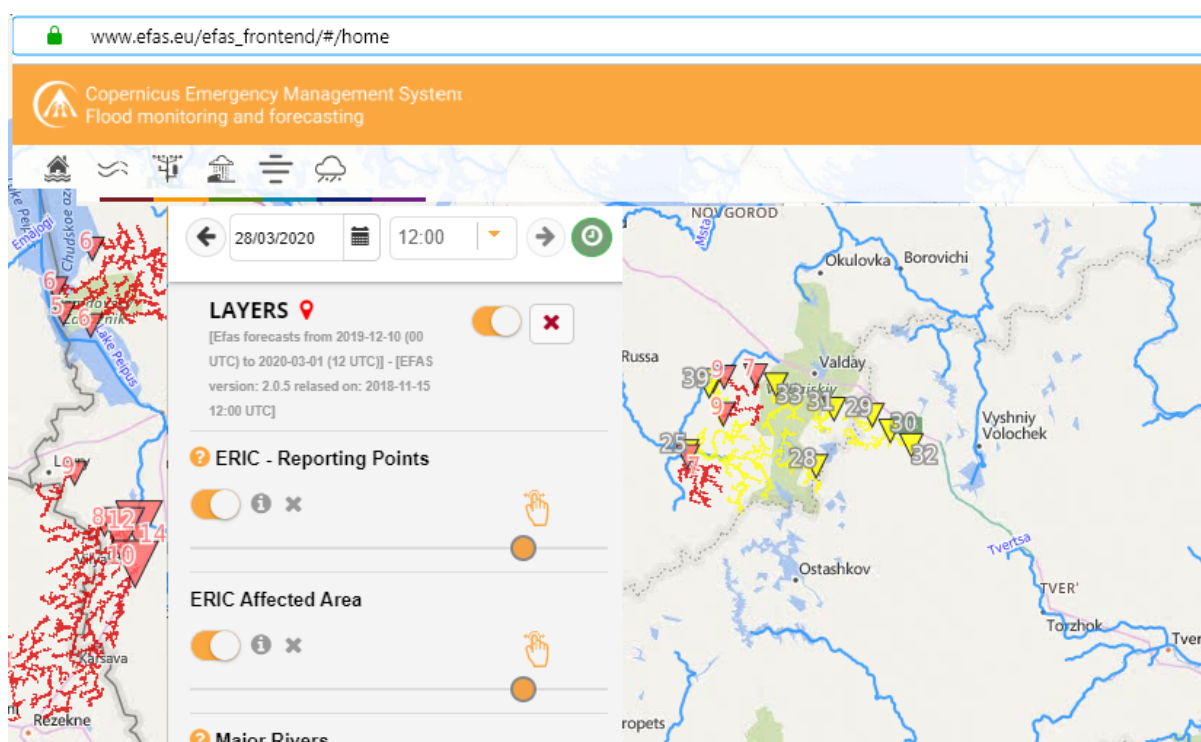
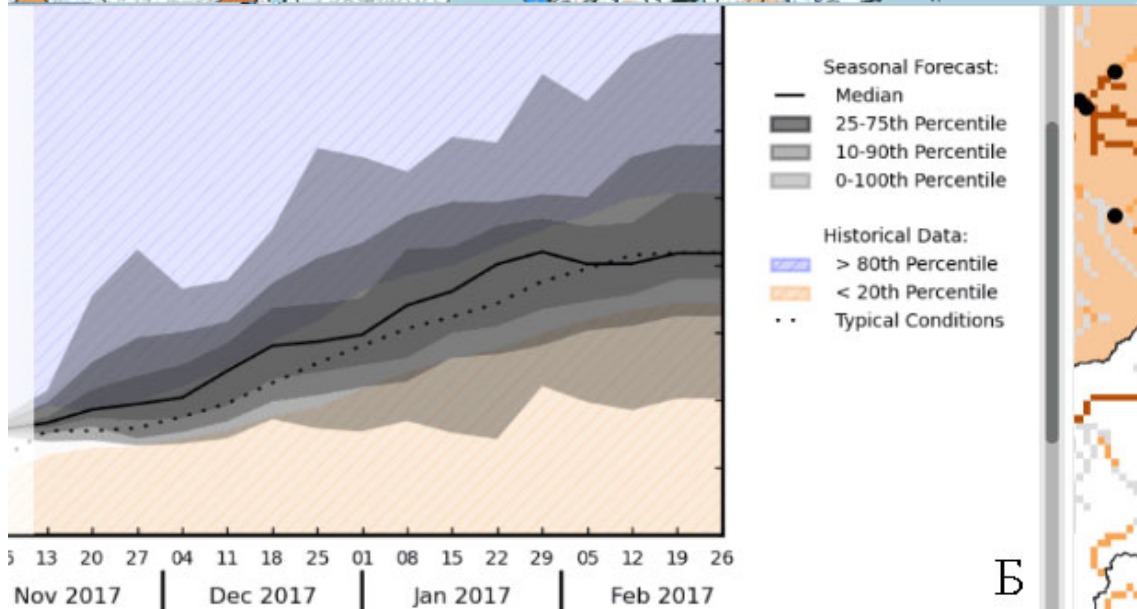
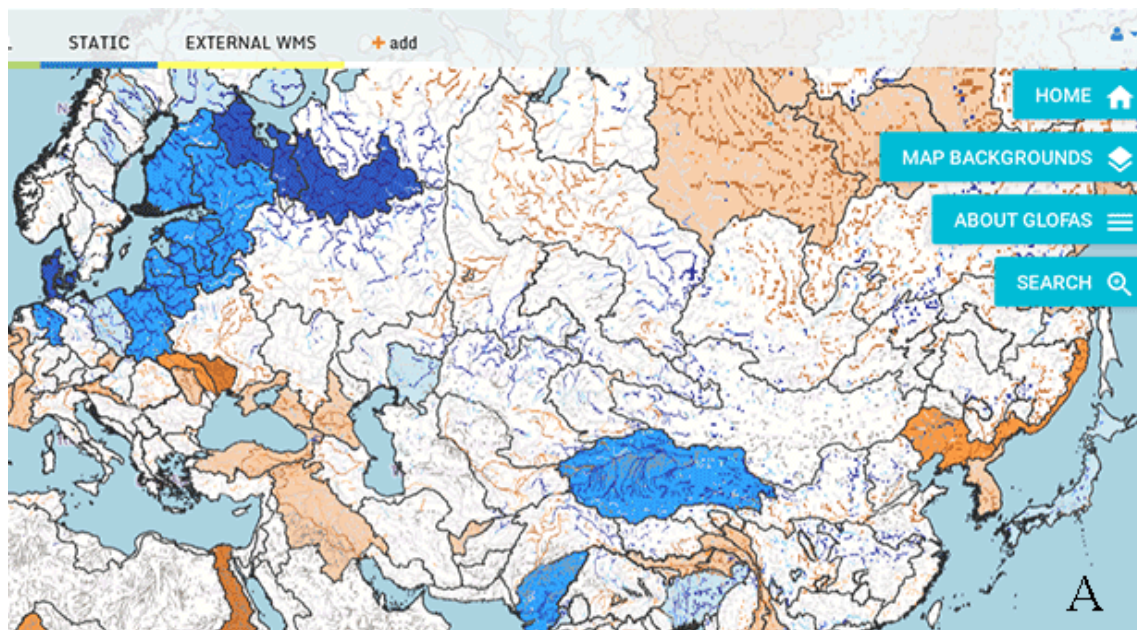


Рис. 3. Фрагмент отображения карты затоплений и основных гидрологических параметров в Европейской системе информирования о наводнениях по состоянию на 28.03.2020

С 2017 г. внедрена и работает Глобальная система информирования о наводнениях (GloFAS), предупреждающая о сезонных колебаниях уровня на реках [10, 11]. Первый слой сезонного прогноза системы GloFAS обновляется 10 числа каждого месяца и отображает максимальную вероятность высокого (синего) или низкого (оранжевого) речного стока в течение последующих четырех месяцев для основных мировых речных бассейнов (рис. 4 А).



Probability of exceeding high flow threshold.

Forecast Day	07	14	21	28	04	11	18	25	02	09	16	23	30	06	13	20	27
2017-08-01				16	24	18	20	18	22	25	20	14	31	35	33	27	
2017-09-01				100				16	6	4	8	20	20	16	18	20	20
2017-10-01									100	100		2	12	24	14	8	14
2017-11-01														53	14	57	47

B

Рис. 4. Примеры содержания информации в слоях GloFAS:

А – максимальная вероятность высокого (синий) или низкого (оранжевый) речного стока; Б – гидрографы для 4-х последующих месяцев с различной %-ной обеспеченностью; В – сезонный прогноз вероятных превышений высоких и низких значений стока в исследуемый период

Следующий слой обеспечивает дополнительную детализацию в масштабе бассейнов рек: речная сеть окрашивается в соответствии с максимальной вероятностью высокого (голубое затенение) или низкого (оранжевое затенение) речного стока. Для каждого отчетного пункта представлены ансамблевые гидрографы (рис. 4 Б), отображающие вероятностный прогноз еженедельного усредненного стока реки на 4 месяца. Для каждой недели горизонта прогноза в каждой отчетной точке (рис. 4 В) также представлены значения вероятности превышения высоких и низких пороговых значений стока.

### *Заключение*

Для надежной эксплуатации трубопроводных систем, организации и проведения плановых и ремонтных работ, крайне важна информация о паводковой ситуации в коридорах трассы. Особенно информация об уровне затопления актуальна на участках перехода магистральных трубопроводов через водные преграды. Для диспетчерского управления важно своевременно оценить риски затопления объектов МТ и при необходимости разработать предупреждающие мероприятия. Информация об уровне воды важна и в случае затопления объектов магистральных трубопроводов, в том числе, для оценки мест возможного подъезда к затопленным объектам, планирования маршрутов, анализа возможных последствий и др.

При мониторинге паводковой обстановки для определения уровня воды традиционно используется информация, поступающая с гидрологических постов. При этом в редких случаях она дополняется информацией космической съемки. Однако, практика показывает, что сеть гидрологических постов для задач мониторинга недостаточная и постоянно уменьшается [12]. Площадь водосбора, приходящаяся на 1 гидрологический пост в России, составляет 5546 км<sup>2</sup>, что существенно больше чем в Канаде (3691), Австралии (3660), Бразилии (1702), Беларуси (1526). В такой ситуации, потребность в оперативном получении данных дистанционного зондирования существенно возрастает, как возрастает и потребность в методиках автоматизированной обработки материалов ДЗЗ для задач мониторинга затопления территорий.

Для анализа паводковой обстановки авторы построили индексное изображение NDWI, используя материалы, полученные съемочной системой Sentinel-2, на территорию подводного перехода магистрального нефтепровода. Анализ снимков, полученных за период наводнения, показал высокую эффективность использования выбранного метода при мониторинге затоплений объектов инфраструктуры трубопровода.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение возможности использования для анализа затопления индексных изображений, не рассмотренных в настоящей работе: NDMI, MNDWI, WRI, NDVI, AWEI и др., применения данных других съемочных систем, спектральных диапазонов и пространственного разрешения.

Отдельно следует сказать о важности изучения опыта построения информационных систем, позволяющих строить вероятностный прогноз до начала навод-

нения, а также моделировать пространственно-привязанные сценарии затопления территории [13].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 65–81.
2. Sentinel-2 // ESA. Sentinel Online [Electronic resource]. – Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (last access: 12 April 2020).
3. Катаев М. Ю., Бекеров А. А. Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 652–656.
4. Катаев М. Ю., Катаев С. Г., Бекеров А. А. Методика поиска изменений из анализа спутниковых данных спектрорадиометра MODIS // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4 (38). – С. 128–133.
5. Катаев М. Ю., Бекеров А. А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017, том 20, № 4. – С. 105–108.
6. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 75, No. 11. – P. 1307–1317.
7. Зенкин О. В., Мелкий В. А., Малинников В. А., Долгополов Д. В. Прогнозирование поверхностного стока половодий и дождевых паводков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 3. – С. 79–84.
8. Зенкин О. В., Мелкий В. А. Разработка модели определения количественных характеристик динамически устойчивых русловых форм // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 156–172.
9. Access the map viewer // EFAS: European Flood Awareness System [Electronic resource]. – Available at: [https://www.efas.eu/efas\\_frontend/#/home](https://www.efas.eu/efas_frontend/#/home) (last access: 02 April 2020).
10. Harrigan Sh., Zsoter E., Lavers D. A., Alfieri L., Prudhomme Ch., Cloke H., Richardson D. S., Salamon P., Stephens E., Pappenberger F. Poster # 549 Evaluation of GloFASv2 Hydrological Forecast Skill at the Global Scale. 100th American Meteorological Society Annual Meeting, 34th Conference on Hydrology, 12–16 January 2020, Boston Convention and Exhibition Center [Electronic resource]. – Available at: <https://ams.confex.com/ams/2020Annual/meetingapp.cgi/Paper/367973> (last access: 12 April 2020)
11. Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F. Barnard C., Cloke H., Pappenberger F. (2020) GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979-present, Earth System Science Data Discussions, <https://doi.org/10.5194/essd-2019-232>, in review.
12. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2015 году». [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_vodnykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyu\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_vodnykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2015\\_god/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_vodnykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyu_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_vodnykh_resursov_rossiyskoy_federatsii_v_2015_god/) (дата обращения 12.04.2020).
13. Аврунев Е. И., Карпик А. П., Мелкий В. А. Принципы формирования единого геопространства территорий // В сборнике: Проблемы геологии и освоения недр Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина: в 2х томах. 2019. С. 428-429.

© В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов, А. А. Верхотуров, 2020