

## Применение данных дистанционного зондирования для широкомасштабного мониторинга водно-болотных угодий

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: [shinkarenko@d902.iki.rssi.ru](mailto:shinkarenko@d902.iki.rssi.ru)

В представленном обзоре проанализированы существующие технологии картографирования водно-болотных угодий (ВБУ) на основе данных дистанционного зондирования Земли. ВБУ являются ценнейшими экосистемами с высокой природоохранной ролью. Существует множество классификаций ВБУ, включающих десятки типов, что усложняет их применение для картографирования. В то же время имеющиеся обновляемые карты ВБУ глобального или национального уровня, как правило, практически не учитывают их ландшафтную специфику и ограничиваются всего несколькими классами. Торфяники, заболоченные леса, высокопродуктивные луга и заросли прибрежной растительности содержат значительный запас углерода, который высвобождается в виде парниковых газов в атмосферу из-за пожаров, интенсивность которых растёт в последние годы вследствие климатических изменений. В этой связи требуется разработка новых методов широкомасштабного мониторинга состояния ВБУ, включая картографирование их типов, измерение запасов фитомассы и углерода, оценку последствий ландшафтных пожаров с определением объёмов эмиссий парниковых газов и других продуктов горения. В первую очередь необходима разработка системы классификации ВБУ России, которая учитывала бы их ландшафтное разнообразие, но в то же время была достаточно генерализованной для решения задач спутникового мониторинга и ежегодного обновления карт ВБУ. Для картографирования ВБУ применяются все типы данных дистанционного зондирования Земли, включая спутниковые наблюдения и аэросъёмку с помощью оптических, лидарных и радарных съёмочных систем. Наиболее перспективным направлением для разработки технологий мониторинга состояния ВБУ на национальном уровне представляется использование многолетних однородных рядов данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) в сочетании с калибровочными наземными измерениями, спутниковыми оптическими и радарными данными высокого пространственного разрешения.

**Ключевые слова:** водно-болотные угодья, дистанционное зондирование, ландшафтные пожары, определение фитомассы, картографирование

Одобрена к печати: 16.10.2023  
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34

### Введение

Водно-болотные угодья (ВБУ) являются ценными природными объектами, играющими огромную роль в сохранении биологического и ландшафтного разнообразия: это места гнездования, зимовок и миграций птиц, нерестилища рыб, резервуары углерода и источники пресной воды. Множество ВБУ охраняются Рамсарской конвенцией (Конвенция о водно-болотных угодьях, *англ.* Convention on Wetlands) с учётом потенциальных угроз, включающих различные природные и антропогенные факторы (Xu et al., 2019). В широком смысле к водно-болотным угодьям могут быть отнесены поймы и дельты рек, прибрежные участки морей и крупных озёр, а также болота. Болота — уникальные природные ландшафты, участвующие в регулировании газового состава атмосферы, водного баланса биосферы и биологического разнообразия (Vaird et al., 2013). Торфяные болота являются наиболее значимым на суше долговременным накопителем атмосферного углерода. ВБУ с мощностью торфяной залежи более 30 см относятся к болотам, а при меньшей глубине торфа — к заболоченным землям (Вомперский и др., 2005). По разным оценкам, болотные экосистемы мира содержат 120–455 млрд т углерода (Ефремов и др., 1994; Кудеяров и др., 2007), из них свыше 70 млрд т аккумуляровано в болотах Западной Сибири (Sheng et al., 2004).

Пойменные и дельтовые ландшафты также обладают высокой природной и хозяйственной ценностью, становясь нерестилищами рыб. В зоне недостаточного увлажнения на юге России в поймах рек (например, Волги, Дона, Кубани, Терека в нижнем течении) сохраняются естественные леса, в то же время значительная часть этих земель выведена из естественного гидрологического режима и используется в орошаемом земледелии. Околородная растительность представлена высокопродуктивными растительными сообществами с доминированием рогоза и тростника, продуктивность которых может составлять 5–7 т/га в год и более (Бармин, Голуб, 2000). Климатические и гидрологические изменения, зарегулирование речного стока приводят к сокращению площадей, длительности заливания пойм при половодьях и последующей деградации пойменных экосистем Нижнего и Среднего Дона (Шинкаренко, Васильченко, 2023; Kuzmina et al., 2022; Solodovnikov, Shinkarenko, 2020), Нижней Волги (Шинкаренко и др., 2021; Kuzmina et al., 2018), рек Средней Азии (Kuzmina et al., 2019).

Установлено, что снижение водности половодья на Нижней Волге приводит к росту горимости пойменных ландшафтов (Шинкаренко и др., 2022), что вызывает выбросы значительной массы парниковых газов и других продуктов горения, учитывая большую массу сгорающей растительности. Осушение болот также приводит к интенсификации торфяных пожаров (Sirin, Medvedeva, 2022). Эмиссии парниковых газов при пожарах на нелесных землях водно-болотных угодий не попадают в соответствующий национальный кадастр. Более того, пройденные огнём площади практически не фиксируются, если пожары не представляют угрозы населённым пунктам или объектам хозяйства. Значительная часть пожаров происходит там, где их своевременное тушение невозможно из-за заболоченности, большого количества водоёмов и водотоков, ограничивающих передвижение наземной техники, а недостаточные глубины и зарастание водной растительностью препятствует движению катеров и маломерных судов. В результате пожары беспрепятственно распространяются на значительные площади. По этим причинам необходима разработка методов, основанных на данных дистанционного зондирования Земли, для определения биомассы растительности, сгораемой при пожарах на водно-болотных угодьях.

Для определения эмиссий парниковых газов при пожарах необходимо определить ряд характеристик: тип экосистемы, пройденную огнём площадь, запас фитомассы и степень её сгорания, коэффициенты конверсии фитомассы в массу продуктов горения (Shvidenko et al., 2011). Рассматриваемый в настоящем обзоре спектр научных проблем включает в себя исследования возможностей картографирования водно-болотных угодий, а также определения запасов надземной фитомассы на основе данных дистанционного зондирования различного пространственного разрешения.

### **Данные дистанционного зондирования, применяемые для картографирования водно-болотных угодий**

Водно-болотные угодья представлены на многих современных глобальных картах земного покрова (например, (Chen et al., 2014; Zanaga et al., 2021)), однако количество их классов ограничено (водоёмы, болота, мангры, заливные луга). На самом деле, разнообразие водно-болотных угодий гораздо выше, включая также болота и поймы с древесно-кустарниковой растительностью, обычно не учитываемые на картах ВБУ. Это разнообразие является принципиальным при оценке баланса углерода ВБУ в естественных условиях и особенно при нарушениях, включая пожары.

Существующие оценки площадей ВБУ в мире значительно разнятся: от  $5,6 \cdot 10^8$  га (Dugan, 1993) до  $1,2 \cdot 10^9$  га (Finlayson, Spiers, 1999). Для Западной Сибири указывается площадь болот  $5,07 \cdot 10^8$  га, что составляет около 11 % от площади болот планеты (Герентьева и др., 2020). Ещё более противоречивы данные о площади различных категорий болот. Разницу в оценке площади распространения ВБУ можно объяснить тем, что зачастую не учитываются динамические процессы развития болотных систем, к тому же применяемые для картографирования спутниковые данные имеют различное пространственное разрешение и даже само понятие

ВБУ часто трактуется неодинаково. Существует несколько различных классификаций водно-болотных угодий. Например, Служба рыболовства и дикой природы США (*англ.* United States Fish and Wildlife Service) придерживается следующей классификационной системы ВБУ: морские (*англ.* Marine), речные (*англ.* Riverine), озёрные (*англ.* Lacustrine), болотные (*англ.* Palustrine) ВБУ и эстуарии (*англ.* Estuarine), которые, в свою очередь, делятся на подсистемы и классы с учётом зависимости от приливов и отливов, сгонно-нагонных явлений, сезонности, гидрологического режима. В Канаде принята классификация ВБУ на торфяные болота (*англ.* Bog), низинные болота (*англ.* Fen), марши (*англ.* Marsh) и заболоченные земли (*англ.* Swamp), которые разделяются на формы (в зависимости от геоморфологических условий) и типы по гидрологическому режиму и преобладающему типу растительного покрова (Fournier et al., 2007). Согласно (Mitsch, Gosselink, 2007) под ВБУ понимаются переувлажнённые территории, в том числе заболоченные местности, марши, поймы и дельты, лагуны, мангры, торфяные болота, торфяники, лиманы и др.

Одной из первых масштабных работ по классификации болот в России можно назвать Типологическую карту болот Западно-Сибирской равнины (Романова и др., 1977), в которой выделялись следующие высшие единицы типологии болотных массивов: полигональные олиготрофные и мезоэвтрофные болота; плоскобугристые олиготрофные и олиго-мезотрофные болота; крупнобугристые олиго-мезотрофные и олиго-эвтрофные болота; выпуклые олиготрофные (сфагновые) болота; плоские эвтрофные и мезотрофные (осоково-гипновые и лесные) болота; вогнутые эвтрофные (тростниковые) и засоленные (травяные) болота. В работе (Dyukarev et al., 2017) только для среднетаёжной зоны Западной Сибири предложено 23 типа болотных экосистем. И.Е. Терентьева с соавторами (Terent'eva et al., 2017) предлагают для южно-таёжной зоны Западной Сибири 10 классов болот: рямы, согры, веретьевые комплексы, открытые олиготрофные, мезо- и эвтрофные болота и четыре типа гряды-мочажинных комплексов. Согласно Рамсарской конвенции о водно-болотных угодьях выделяется 42 типа ВБУ, которые сгруппированы в категории морских, устьевых, озёрных, речных, болотных и антропогенных. В России выделяют три царства ВБУ: морские, долинные и бессточные водораздельные, которые, в свою очередь, делятся на 11 типов, 27 классов и более 70 групп (Кривенко, Виноградов, 2000). В 1994 г. Постановлением Правительства Российской Федерации (№ 1050 от 13 сентября 1994 г.) в России было выделено 35 водно-болотных угодий международного значения общей площадью 10,7 млн га.

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяются для картографирования и мониторинга состояния водно-болотных угодий по всему миру. В задачи изучения ВБУ по данным ДЗЗ входят: исследования растительного покрова (видовой состав, биофизические параметры), классификация и картографирование типов земного покрова и их многолетней динамики, картографирование и сохранение местообитаний растений и животных, мониторинг биоразнообразия, распространения инвазивных видов, качества поверхностных вод, влажности почв, прогнозирование и картографирование половодий и наводнений, оценка выгоревших площадей и последствий ландшафтных пожаров (Медведева и др., 2019; Dronova et al., 2021; Guo et al., 2019; White et al., 2015). При этом используются практически все существующие типы данных ДЗЗ. Наиболее широко применяются для картографирования распространения и типов ВБУ мультиспектральные спутниковые системы ДЗЗ низкого (AVHRR — *англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer; MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; VIIRS — *англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), среднего (MODIS, Proba-V) или высокого (Landsat, Sentinel-2) пространственного разрешения. Вопрос классификации спутниковых данных по пространственному разрешению является дискуссионным, а общепринятые градации для размеров пикселей отсутствуют. По этим причинам в данной работе принята следующая классификация: сверхвысокое и очень высокое разрешение (<10 м/пиксель), высокое разрешение (10–30 м/пиксель), среднее (30–300 м/пиксель) и низкое (>300 м/пиксель).

В обзоре (Mahdianpari et al., 2020) проанализировано более 10 тыс. источников с результатами картографирования ВБУ, большая часть из которых посвящается анализу состояния растительности (22,4 %), классификации ВБУ (15,6 %), картографированию динамики земного

покрова (13,1 %). Подавляющее большинство исследований (33,7 %) выполнялось на основе спутниковых данных пространственного разрешения от 4 до 30 м, материалов аэросъёмки (18,3 %) и радарных данных (16,7 %). Данные низкого или сверхвысокого пространственного разрешения использовались в 11 и 7 % работ соответственно, остальные исследования приходятся на применение гиперспектральных и лидарных данных. Подобные тенденции использования данных ДЗЗ для картографирования ВБУ подтверждаются и другими обзорами (Mahdavi et al., 2018; Mirmazloumi et al., 2021).

Высокая доля исследований, выполненных на основе аэросъёмки, объясняется тем, что до 1970–1980-х гг. технологии получения данных ДЗЗ из космоса были развиты значительно хуже, чем в настоящее время. Это подтверждается заметным снижением количества исследований ВБУ на основе аэросъёмки после начала 1990-х гг. Появление доступных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в XXI в. существенно увеличило количество проводимых на основе аэросъёмки исследований (Dronova et al., 2021). Простота, возможность использования различной съёмочной аппаратуры (фотокамеры, мульти- и гиперспектральные камеры, радары, лидары, тепловизоры, магнитометры, георадары и др.) способствовали широкому распространению БПЛА. Использование доступных программ для формирования полётных заданий позволяет превратить практически любой БПЛА в инструмент получения данных для создания ортофотопланов и цифровых моделей местности (Flores-de-Santiago et al., 2020). В дальнейшем ортофотопланы (ортофотомозаики) могут классифицироваться на основе широко распространённых в ДЗЗ алгоритмов, таких, например, как «случайный лес» (англ. Random Forests) (Liu T. et al., 2019), сегментация на основе объектно-ориентированного анализа (Shang et al., 2018) или методы глубокого обучения и нейросетей (Pashaei et al., 2020). Также широко используются методы классификации плотного облака точек, получаемого фотограмметрической обработкой материалов аэросъёмки (Медведев и др., 2020). В большинстве случаев БПЛА применяются для изучения речных берегов и пойм, морских побережий и мангров, торфяников и пресноводных маршей. Болотные экосистемы практически не охвачены исследованиями с помощью БПЛА (Dronova et al., 2021). Это может быть вызвано ограниченностью площади воздушных съёмок и дальности полёта БПЛА, что критически важно в условиях труднодоступных болот. Поэтому обширные ВБУ исследуются преимущественно на основе спутниковых данных ДЗЗ, а данные аэросъёмки применяются в качестве опорной информации для настройки алгоритмов их обработки и верификации результатов.

Достоинство спутниковых методов ДЗЗ заключается в обеспечении возможности единовременной обзорности состояния труднодоступных ВБУ, что позволяет получать оценки характеристик больших территорий. С учётом того, что на современном этапе технологии дистанционного зондирования доказали свою эффективность в мониторинге ВБУ, а также принимая во внимание, что практически вся территория России многократно покрыта многоспектральными изображениями, полученными различными спутниковыми системами, для картографирования болот открываются широкие перспективы.

Наиболее распространены в исследованиях водно-болотных угодий в мире мульти-спектральные данные пространственного разрешения до 30 м. К ним относятся прежде всего свободно доступные данные спутниковых систем ДЗЗ Landsat и Sentinel-2 с достаточным пространственным разрешением для большинства задач картографирования ВБУ: 30 м у Landsat-5...-9 (возможность улучшения до 15 м за счёт панхроматического канала Landsat-7...-9) и 10–20 м у Sentinel-2. Также продолжительность миссии Landsat превысила 50 лет, что даёт возможность осуществлять анализ долговременных изменений состояния ландшафтов, в том числе ВБУ. Экосистемы ВБУ часто имеют относительно небольшие размеры из-за сложного рельефа, многочисленных рек, рукавов, протоков и озёр. По этой причине данные низкого разрешения (300 м/пиксель и ниже) применяются довольно ограниченно. Повышение пространственного разрешения использованных данных для картографирования ВБУ приводит к существенному увеличению точности определения границ болотных экосистем разных типов, но требует больших вычислительных ресурсов (Mahdianpari et al., 2020).

Радарные данные в сравнении с оптическими практически свободны от влияния атмосферы на получаемые результаты, что крайне важно для картографирования ВБУ, где часто

наблюдается облачность (White et al., 2015). В России проблема облачности особенно актуальна в весенний период, на который приходится половодье большей части равнинных рек. Кроме непосредственного анализа земного покрова, использование радарных данных позволяет определять ряд биофизических параметров растительности, например высоту и полноту лесов (Барталев и др., 2022) и характеристики рельефа. Комплексное использование различных данных ДЗЗ позволяет существенно улучшить результаты картографирования ВБУ. Радарные и лидарные данные могут использоваться совместно (Allen et al., 2013), а также в совокупности со спутниковыми мультиспектральными данными различного пространственного разрешения (Huang et al., 2014; Mizuochi et al., 2014; Rapinel et al., 2015) или материалами аэросъёмки (Gray et al., 2018) и наземными данными (Flores-de-Santiago et al., 2020). При этом в последние годы отмечен рост комплексных исследований ВБУ (Mahdianpari et al., 2020; Mirmazloumi et al., 2021).

Также картографирование ВБУ может основываться на комплексном использовании всех доступных электронных карт ландшафтов, водоёмов, озёр и других элементов земного покрова. Например, глобальная карта ВБУ GLWD-3 (Lehner, Doll, 2004) состоит из трёх уровней. Первый уровень включает полигоны береговой линии более 3 тыс. крупнейших озёр (площадь поверхности  $\geq 50$  км<sup>2</sup>) и более 600 крупнейших водохранилищ (объём воды от 0,5 км<sup>3</sup>) во всём мире. Второй уровень содержит полигоны береговой линии примерно 250 тыс. более мелких озёр, водохранилищ и рек (площадь поверхности  $\geq 0,1$  км<sup>2</sup>), исключая все водоёмы первого уровня. Третий уровень представляет озёра, водохранилища, реки и различные типы водно-болотных угодий в виде глобальной растровой карты с 30-секундным пространственным разрешением, включая все водные объекты первых двух уровней.

Согласно обзорам (Chasmer et al., 2020a, b; Mahdianpari et al., 2020; Mahdavi et al., 2018; Mirmazloumi et al., 2021; Wohlfart et al., 2018), практически отсутствуют исследования пожаров и выгоревших площадей ВБУ на основе данных ДЗЗ. Приводятся только отдельные публикации, посвящённые торфяным пожарам (Медведева и др., 2020; Poulter et al., 2006; Rappold et al., 2011; Toriyama et al., 2014). Анализ выгоревших площадей на нелесных землях ВБУ за пределами торфяников уделяется значительно меньше внимания (Шинкаренко и др., 2022; Hayasaka et al., 2020), в то время как они могут служить источником значительных объёмов эмиссий парниковых газов (Сабреков и др., 2016; Guo et al., 2019; Page et al., 2002). Методы картографирования повреждённых пожарами ВБУ по спутниковым данным разделяют на три группы: кластеризация детектированных очагов горения (Giglio et al., 2018), визуальное дешифрирование спутниковых изображений среднего и высокого пространственного разрешения (Шинкаренко и др., 2022; Ostroukhov et al., 2022), автоматизированная обработка данных ДЗЗ (Chuvieco et al., 2018; Giglio et al., 2015; Long et al., 2019). При этом большая часть существующих методов автоматизированного картографирования пожаров, лежащих в основе таких информационных продуктов, как FIRMS (*англ.* The FireInformation for Resource Management System), GABAM, FireCCI51, MCD64A1, MCD45A1, не обеспечивают необходимой точности в оценке пройденных огнём территорий ВБУ (Берденгалиева, 2022). Сложный рельеф, разнообразие экосистем, значительная суточная, сезонная и многолетняя амплитуда колебаний уровня воды и динамика состояния растительного покрова, влажности почвы приводят к тому, что универсальные алгоритмы спутникового картографирования пожаров имеют недостаточную точность. Поэтому необходима разработка новых методов и доработка существующих подходов, например на основе индекса RdSWVI (*англ.* Relative difference Short Wave Vegetation Index — нормализованный разновременной коротковолновый вегетационный индекс) (Барталев и др., 2017) с учётом ландшафтной специфики ВБУ России. Имеющиеся подходы определения объёмов эмиссий парниковых газов при пожарах основываются на данных о пройденных огнём площадях, типах растительного покрова и его характеристиках, степени сгорания природных горючих материалов (Shvidenko et al., 2011), а точность получаемых оценок существенно зависит от качества исходных данных. Развитие подходов к определению пройденных огнём площадей и наземной биомассы ВБУ позволит повысить качество получаемых оценок объёмов эмиссий парниковых газов при пожарах в ландшафтах водно-болотных угодий России и других стран.

## Картографирование распространения и типов водно-болотных угодий по данным дистанционного зондирования

Спутниковые данные низкого пространственного разрешения применяются для широкомасштабного картографирования ВБУ, при этом, как правило, ВБУ выделяются как тип земного покрова на соответствующих глобальных картах (LULC — *англ.* Land Use/Land Cover, землепользование/земной покров). Существуют карты земного покрова глобального или континентального охвата разрешения 1 км, включающие класс ВБУ, разработанные на основе данных AVHRR (Loveland et al., 1991; Stone et al., 1994), MODIS (Mayaux et al., 2003), SPOT-Vegetation (Bartholome et al., 2002). Также в рамках международного проекта Global Land Cover 2000 была создана карта наземных экосистем Северной Евразии с пространственным разрешением около 1 км, отражающая пространственное распределение основных типов растительности и не покрытых растительностью земель по состоянию на 2000 г. (Bartalev et al., 2003). Цифровая карта наземных экосистем Северной Евразии прошла валидацию и была включена в соответствующую глобальную базу данных (Bartholome et al., 2002). Карта наземных экосистем Северной Евразии включает в себя следующие классы ВБУ: болота, грядово-мочажинные болотные комплексы, прибрежная травянисто-кустарниковая растительность.

Существуют также стандартные, ежегодно обновляемые информационные продукты типов земного покрова по данным MODIS разрешения 500 м (MCD12Q1) и 1000 м (MCD12Q2). Данные MCD12Q1 включают в себя классификацию типов земного покрова согласно легенде Международной геосферно-биосферной программы (*англ.* International Geosphere-Biosphere Programme — IGBP), а также классификацию Университета Мэриленда (*англ.* University of Maryland — UMD), классификацию по индексу листовой поверхности (*англ.* Leaf Area Index — LAI), биомно-биогеохимическую классификацию BIOME-BGS, функциональные типы растений (*англ.* Plant Functional Types — PFT), а также типы земного покрова, землепользования и поверхностных вод согласно определению ФАО (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, *англ.* FAO — Food and Agriculture Organization). Данные IGBP и UMD включают только один класс ВБУ: постоянно затапливаемые земли с покрытием водой 30–60 % и более 10 % растительного покрова. По классификациям LAI, BIOME-BGS, PFT и ФАО ВБУ как тип земного покрова не выделяются (Bartholome et al., 2002; Friedl et al., 2002). Данные MCD12Q2 представляют собой растровые изображения со сведениями о заполненности пикселей размером 1000 м тем или иным типом земного покрова согласно классификациям, использованным в продукте MCD12Q1. Таким образом, классы ВБУ согласно информационному продукту MCD12Q2 соответствуют типам земного покрова по данным MCD12Q1. Также существуют глобальные карты типов земного покрова, объединяющие несколько информационных продуктов. Например, EarthEnv Global 1-km Consensus Land Cover (Tuanmu, Jetz, 2014) представляет собой мировую карту типов земного покрова, интегрирующую описанные выше GlobCover2005, MCD12Q1, Global Land Cover 2000 и продукт DISCover (Loveland, Belward, 1997). Данные EarthEnv Global доступны в виде растра разрешения 30 угл. с, что примерно соответствует 0,93 км (на экваторе), и включают сведения о покрытии каждой ячейки соответствующим типом земного покрова от 0 до 100 %. ВБУ составляют класс регулярно заливаемой водой растительности.

Значительно чаще для широкомасштабного картографирования типов земного покрова, в том числе распространения и типов ВБУ, используются данные среднего пространственного разрешения (до 300 м/пиксель) по данным MODIS или MERIS (*англ.* Medium Resolution Imaging Spectrometer), например GlobCover2009 (Arino et al., 2012). Существуют глобальные растровые данные типов земного покрова, разрабатываемые Европейским космическим агентством (*англ.* European Space Agency — ESA) в рамках инициативы по изучению климатических изменений карты CCI Land Cover разрешения 300 м (Bontemps et al., 2015). Оба информационных продукта содержат по три типа земного покрова, которые можно отнести к ВБУ. Для GlobCover2009 это: сомкнутый или открытый широколиственный лес, регулярно заливаемый пресной или солоноватой водой; сомкнутый широколиственный лес или кустарники, постоянно заливаемые солёной водой; сомкнутые или открытые луга и древесная ра-

стительность на заболоченных почвах, регулярно заливаемые пресной, солоноватой или солёной водой. Информационный продукт CCI Land Cover включает следующие классы ВБУ: древесный покров, заливаемый пресной или солоноватой водой; древесный покров, заливаемый солёной водой; кустарниковый или травянистый покров, заливаемый пресной, солоноватой или солёной водой.

Разработанные в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) и ежегодно обновляемые карты растительного покрова России по данным MODIS разрешения 250 м содержат два класса ВБУ: болота и прибрежная растительность (Барталев и др., 2016). Травянистая, кустарниковая и древесная растительность, расположенная в водно-болотных комплексах, относятся к соответствующим классам без разделения по гидрологическому режиму.

Данные высокого пространственного разрешения (до 30 м) составляют основу большей части исследований ВБУ локального и регионального уровней на основе ДЗЗ (Сирин и др., 2014; Mahdianpari et al., 2020). Также имеются глобальные информационные продукты типов земного покрова, позволяющие выявить распространение ВБУ, например GlobLand30 (GLC30) (Chen et al., 2014) разрешения 30 м, ESRI Land Cover (*англ.* Environmental Systems Research Institute) (Karra et al., 2021), FROM-GLC10 (Gong et al., 2019) и ESA WorldCover (Zanaga et al., 2021) разрешения 10 м, из которых наибольшей пространственной детальностью обладает ESA WorldCover (Ding et al., 2022). Продукты GLC30 и FROM-GLC10 выделяют отдельный класс ВБУ, согласно ESRI Land Cover выделяются только травянистые ВБУ, а ESA WorldCover разделяет травянистые ВБУ и мангры. Данные ESRI Land Cover и ESA WorldCover не подразделяют леса (кроме мангров) по гидрологическому режиму, относя заболоченные и пойменные леса к общей категории лесопокрытой площади. Согласно GLC30 пойменные леса отнесены к ВБУ, также к этой категории отнесены и многочисленные солончаки и соровые понижения, распространённые в засушливой зоне. Существует специализированный глобальный информационный продукт типов земного покрова для ВБУ GWL\_FCS30 разрешения 30 м, включающий следующие классы: постоянные водоёмы, болота, марши, заливаемые равнины, солёные водоёмы, мангры, засоленные марши и приливные равнины (Zhang et al., 2023).

Среди всех источников данных ДЗЗ среднего пространственного разрешения наибольшей популярностью пользуется спутниковая система MODIS. Это связано с доступностью, высоким временным разрешением указанных данных (несколько изображений в сутки) и значительной исторической глубиной архива. Также высокое спектральное разрешение (36 спектральных каналов) данных MODIS позволяет решать разнообразные задачи картографирования ВБУ. Например, картографирование водного зеркала и его динамики, в том числе половодий и наводнений (Chen et al., 2013; Mizuochi et al., 2014; Ordoyне, Friedl, 2008), глубин (Lee et al., 2014) и распространения ВБУ (Dutta et al., 2015). Данные MODIS могут применяться не только для широкомасштабного картографирования распространения ВБУ, но и для его региональной оценки.

Спутниковые данные сверхвысокого пространственного разрешения применяются для картографирования ВБУ значительно реже. Это связано с их большей детальностью, из-за чего традиционные методы попиксельной классификации требуют высоких вычислительных затрат (Mahdianpari et al., 2020). Выходом из этой ситуации стали методы объектно-ориентированного анализа спутниковых изображений и совмещение данных ДЗЗ из разных источников (Dronova, 2015). Данные сверхвысокого пространственного разрешения чаще применяются не только для выделения типов земного покрова, но и для более детального картографирования ВБУ, например выделения местообитаний отдельных, в том числе инвазивных видов, классификации лесов по породам. Также детальные спутниковые изображения используются для калибровки и оценки точности результатов картографирования ВБУ на основе данных более низкого пространственного разрешения (Mahdianpari et al., 2020). Кроме больших затрат на вычислительные операции при обработке данных сверхвысокого разрешения ограничением их применения является также высокая стоимость и низкое временное разрешение. Таким образом, для широкомасштабного картографирования указанный тип данных ДЗЗ имеет ограниченное применение, но может использоваться на отдельных тестовых участках.

По данным (Mahdianpari et al., 2020), до 40 % исследований по спутниковому картографированию ВБУ используют радарные (SAR — *англ.* Synthetic Aperture Radar, радар с синтезированной апертурой) и/или лидарные данные. Преимуществом радарных данных является независимость от облачности, которая зачастую делает невозможными наблюдения в оптическом диапазоне. Кроме того, густой растительный покров многих ВБУ приводит к насыщению сигналов видимого и инфракрасного диапазонов, что затрудняет анализ. Независимость от наличия облачности и освещённости, чувствительность к влажности почвы, возможность проникать под полог растительного покрова сделали радарные данные полезным источником данных ДЗЗ для исследований ВБУ (Adeli et al., 2020; White et al., 2015). Кроме того, отражённое радиолокационное излучение (обратное рассеяние) чувствительно к диэлектрическим свойствам зондируемой поверхности, определяемым в том числе уровнем затопления, влажностью почвы или её солёностью, которые являются важными характеристиками экосистем водно-болотных угодий (Henderson, Lewis, 2015).

Наиболее широко используемыми для исследований ВБУ источниками радарных данных в настоящее время выступают спутниковые системы ДЗЗ Radarsat-2 и ALOS-PAISAR-2 (*англ.* Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar). Сигналы в X-диапазоне не всегда достигают поверхности воды в случае солёных маршей или затопленной растительности (Lee et al., 2012). Это связано с тем, что электромагнитные волны данного диапазона часто взаимодействуют с самой высокой частью растительного покрова, которая больше подвержена влиянию ветра, что приводит к росту уровня неопределённости при оценке характеристик ВБУ. L-диапазон характеризуется наибольшей глубиной проникновения электромагнитного излучения под полог растительности, что позволяет обнаруживать водную поверхность под ним (Adeli et al., 2020) и определять её уровень с высокой точностью (Hong, Wdowinski, 2014). Также данные L-диапазона лучше позволяют оценивать биомассу при близких к насыщению значениях (Lucas et al., 2007). В исследовании С. Планка (*англ.* S. Plank) с соавторами (Plank et al., 2017) установлено, что C-диапазон лучше подходит для картографирования открытых акваторий, а L-диапазон даёт более подробную информацию о затопленной растительности.

В качестве недостатков радарных данных, как и оптических высокого пространственного разрешения, можно выделить относительно низкое временное разрешение, что становится критически важным для картографирования площадей затопления и выгоревших площадей в речных поймах. Подъём воды в половодья и паводки может быть кратковременным, а гари быстро восстанавливаются или заливаются водой, поэтому для их картографирования требуются данные достаточно высокого временного разрешения (Шинкаренко и др., 2023).

### **Картографирование наземной фитомассы водно-болотных угодий по данным дистанционного зондирования**

Растительность ВБУ характеризуется значительной наземной фитомассой, анализ которой является важной частью исследований запасов и потоков углерода в экосистемах (Rocha et al., 2009). Как и при картографировании типов ВБУ, при определении фитомассы используется весь спектр существующих технологий получения данных ДЗЗ. Например, большая часть исследований наземной фитомассы ВБУ, выполненных на основе аэросъёмки, посвящается пространственному распространению результатов выборочных наземных измерений на всю территорию, охваченную материалами съёмки с воздушных летательных аппаратов, либо трёхуровневому картографированию на основе комплексирования информации выборочных наземных обследований и спутниковых данных ДЗЗ, где аэросъёмка служит промежуточным звеном (Dronova et al., 2021). Одиночные аэроснимки могут служить для уточнения дешифровочных признаков или положения тестовых участков для наземного обследования.

На основе фотограмметрической обработки материалов аэросъёмки с использованием специализированного программного обеспечения получают облако точек, где каждой точке кроме плановых географических координат соответствует её высота над референсной поверхностью. Выделение растительного покрова проводится на основе классификации плотного

облака точек как по высоте точек, так и на основе анализа крутизны поверхности. В результате возможно отделение древесной, кустарниковой и травянистой растительности и построение цифровой модели рельефа (ЦМР). Далее путём вычитания ЦМР из ЦММ (цифровой модели местности) рассчитывается высота растительных ярусов (Медведев и др., 2020). После чего на основе полученных данных можно определить горизонтальную структуру растительного покрова, например сомкнутость как отношение количества пикселей, относящихся к растительности, к общему числу пикселей. Также возможна триангуляция облака точек древесной растительности для последующего вычисления сомкнутости через сумму площадей полученных треугольников (Zhang et al., 2022).

Травянистая растительность ВБУ зачастую представлена высокостебельными травами, например *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Spartina alterniflora* и др., достигающими в высоту 2–3 м и более. Таким образом, растительные сообщества указанных видов могут быть определены на основе анализа материалов аэросъёмки с применением описанных выше подходов. Для сопоставления наземных измерений фитомассы и данных аэросъёмки все модельные площадки должны иметь точные географические координаты, получаемые с использованием приборов глобальных навигационных спутниковых систем. Для оценки биомассы травянистой растительности обычно используются стандартные геоботанические площадки 10×10 м, на которых выделяется несколько укосных площадок от 0,25×0,25 до 1×1 м в зависимости от однородности растительного покрова. Далее полученные данные о проективном покрытии и биомассе на модельных площадках сопоставляются с вегетационными индексами, рассчитанными на основе данных аэросъёмки. Поскольку значительная часть аэросъёмки выполняется в видимом диапазоне, то применяются и вегетационные индексы, которые основываются на данных в красном, зелёном и голубом каналах. Исследование, проведённое Г.Р. Морганом (англ. G. R. Morgan) и соавторами (Morgan et al., 2021) в Северной Америке, показало наличие связи между биомассой и высотой *S. alterniflora* и вегетационными индексами (ВИ) TGI (англ. Triangular Greenness Index) и ExG (англ. Excess Green Index). Получаемые таким образом уравнения связей между биомассой в точках наземных измерений и ВИ, рассчитанными по данным аэросъёмки, позволяют провести картографирование биомассы для всей исследуемой территории. Выбор ВИ основывается на сопоставлении опорных данных и соответствующих значений ВИ, далее выбирается индекс с максимальным коэффициентом детерминации  $R^2$  и минимальной среднеквадратической ошибкой RMSE (англ. Root Mean Square Error) (Lu et al., 2022). Для различных растительных сообществ наиболее информативные ВИ могут различаться в зависимости от проективного покрытия, высоты, фенологических фаз и других факторов.

Также возможно определение фитомассы через высоту растительности: на основе наземных данных определяются регрессионные зависимости надземной фитомассы и высоты травостоев, после чего на основе разницы ЦММ и ЦМР через высоту растительного покрова рассчитывается биомасса. Подобный подход показал достаточную точность при определении биомассы тростника в Китае (Lu et al., 2022). В исследовании (Corti Meneses et al., 2018) для картографирования тростниковых зарослей использовалось дерево решений, с помощью которого выполнялась классификация облака точек по высоте (разделение водной поверхности и растительности) и по значениям ВИ (отделение тростниковых от других растительных сообществ). Также для анализа фитомассы находят применение БПЛА с двух- и трёхкамерными системами (Baier et al., 2022). Наличие БПЛА с мультиспектральными камерами позволяет использовать ВИ, широко применяемые в ДЗЗ из космоса. Например, авторы работы (Doughty, Cavanaugh, 2019) установили наиболее тесную связь надземной биомассы прибрежной растительности в Санта-Барбаре (США, Калифорния) и NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) в сравнении с другими ВИ, использующими ближний инфракрасный (ИК) диапазон.

Запас древесины также может быть определён с помощью материалов аэросъёмки на основе их сопоставления с наземными измерениями, моделями хода роста и известными соотношениями между высотой, диаметром ствола и запасом. Подобные исследования проводились на ВБУ Португалии (Fernandes et al., 2020), США (Doughty et al., 2021), Шотландии

(Dugdale et al., 2019), Австралии (Navarro et al., 2020), России (Медведев и др., 2020) и других стран.

Важную роль данные аэросъёмки играют для экстраполяции выборочных наземных измерений на модельных площадках на большую территорию, которая анализируется по спутниковым данным высокого или среднего пространственного разрешения. На основе совмещения наземных данных и материалов аэросъёмки формируются калибровочные и контрольные опорные выборки для обработки спутниковых изображений и оценки точности получаемых результатов. В исследовании Л. Лу (*англ.* L. Lu) с соавторами (Lu et al., 2022) сопоставлялись величины наземной фитомассы тростника, полученные методом укосов на пробных площадях, и спутниковые изображения Sentinel-2. Для каждого пикселя Sentinel-2 размером 10×10 м проводилось усреднение фитомассы, рассчитанной по аэроснимкам на основе наземных данных. В результате было получено уравнение связи между индексом RVI (*англ.* Radar Vegetation Index — радарный вегетационный индекс) по данным Sentinel-2 и фитомассой со среднеквадратической ошибкой около 30 %, что позволило выполнить оценку фитомассы тростника на значительно большей площади по сравнению с данными аэросъёмки.

Кроме изображений видимого и ближнего ИК-диапазонов находят применение и данные лидарной аэросъёмки, которые часто используются в связке со спутниковыми изображениями. Использование лидарных и радарных данных позволяет разделять ярусы древесной растительности за счёт лучшей проникающей способности электромагнитного излучения. При этом выделение ярусов растительности основывается на классификации облака точек по аналогии с данными видимого диапазона (Navarro et al., 2020). В результате также получают данные о высоте растительности, на основе которых может быть выделен полог и рассчитана его сомкнутость. Далее в каждом пикселе Sentinel-2 рассчитываются средние значения высоты растительности и сомкнутость полога на основе данных аэросъёмки и сопоставляются с яркостными характеристиками земной поверхности. При этом данные аэросъёмки могут выступать в качестве опорной выборки для проведения классификации, например методом случайного леса (Wang et al., 2020).

Ограничением использования материалов аэросъёмки для картографирования наземной биомассы ВБУ становятся относительно небольшие возможности по территориальному охвату и недостаточная частота съёмки. Спутниковые данные ДЗЗ в большей степени свободны от этих ограничений и применяются для подобных целей значительно чаще (Mahdianpari et al., 2020). Определение наземной биомассы по спутниковым данным ДЗЗ обычно основывается на одном из трёх подходов: установлении эмпирических взаимосвязей между фитомассой, спектрально-отражательными характеристиками и вегетационными индексами; использовании моделей эффективности поглощения солнечного излучения — фотосинтетически активной радиации; применении моделей процессов переноса излучения, вещества и энергии в системе «почва — растительность» (Moreau et al., 2003). Наиболее широко в исследованиях биомассы ВБУ используются первые два метода, поскольку для третьего довольно сложно получить необходимый набор входных параметров для моделирования. Для картографирования биомассы ВБУ применяются данные ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения.

Спутниковые данные низкого разрешения (300 м и ниже) используются, как правило, для глобальных оценок биомассы. По данным прибора MODIS разработаны информационные продукты валовой (*англ.* Gross Primary Production — GPP) и чистой (*англ.* Net Primary Production — NPP) первичной продукции, имеющие пространственное разрешение 500 м. Продукт GPP на базе спутников Terra (MOD17A2) и Aqua (MYD17A2) имеет временное разрешение восемь дней, а NPP (MOD/MYD17A3) содержит сведения о чистой первичной продукции как за календарный год, так и за восьмидневный период. Определение GPP основывается на данных о поглощённой растительностью фотосинтетически активной радиации (*англ.* Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation — FAPAR) по данным продукта MOD15 и независимой оценки приходящей солнечной радиации. С помощью оценки условий дыхания и обмена веществ для поддержания роста растительности с вычита-

нием соответствующей составляющей из GPP получают чистую первичную продукцию NPP. Необходимые данные для этих расчётов получают из аллометрических соотношений между суточным приростом биомассы и оценками индекса листовой поверхности LAI по данным продукта MOD15. Эти аллометрические соотношения были разработаны на основе обширного обзора литературы и включают те же параметры, что используются в модели экосистемного процесса Biome-BGC (White et al., 2000). Пиксели указанных информационных продуктов содержат значения удельной массы углерода в растительности на единицу площади земной поверхности.

Вместе с тем получаемые по данным MODIS глобальные информационные продукты не дают возможности учесть ландшафтные особенности территории, в том числе особенности ВБУ (Niu et al., 2016). Сравнительный анализ данных MODIS GPP и наземных данных, полученных с помощью вышки с аппаратурой для измерения вихревой ковариации, проведённый на болотах в штате Джорджия, США, показал, что простая эмпирическая модель на основе ВИ значительно точнее описывает потоки углекислого газа в условиях приливно-отливных явлений в изучаемых ВБУ (Tao et al., 2018). По данным работы (Qiu et al., 2020), продукт MYD17 характеризуется занижением оценки GPP не только для ВБУ, но и для всех других типов земного покрова по сравнению с наземными измерениями, несмотря на высокую корреляцию. Авторы этого исследования установили, что наибольшей точностью по сравнению с вышками измерения вихревой ковариации обладает продукт GOSIF GPP (*англ.* global SCO-2-based solar-induced chlorophyll fluorescence), разработанный на основе спутниковых данных SCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory 2), MODIS и материалов ретрансляции климатических данных. Регрессионная модель с входными параметрами (EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index — усовершенствованный вегетационный индекс), типы земного покрова, температура воздуха, дефицит влажности воздуха и фотосинтетически активная радиация) позволила получить растр пространственного разрешения  $0,05^\circ$  и с временной частотой восемь дней со значениями индуцированной флуоресценции хлорофилла (*англ.* sun-induced chlorophyll fluorescence — SIF) (Li, Xiao, 2019). Исследование, проведённое на заболоченных альпийских лугах Тибета, показало, что оценки валовой первичной продукции GPP MODIS занижены на 40 % по сравнению с измеренным потоком вихревой ковариации (Niu et al., 2016).

Ещё один распространённый метод картографирования биомассы по спутниковым данным — построение эмпирических зависимостей спектрально-отражательных характеристик или вегетационных индексов, определяемых по данным ДЗЗ, и продуктивности растительности по наземным измерениям. При этом для картографирования годовой продукции фитомассы рекомендуется использование данных не на отдельные даты, а усреднённых или максимальных за вегетационный период или фенологическую фазу. В исследовании регулярно заливаемых ВБУ Испании установлено, что максимальный NDVI значительно лучше коррелирует с измеренной фитомассой по сравнению с изображением на отдельную дату (Lumbierres et al., 2017). Временные ряды ВИ играют очень важную роль в исследованиях растительности, при этом разработанные в ИКИ РАН ежедневные композитные изображения, свободные от влияния облачности, позволяют наиболее точно выделить нужные фенологические фазы и определить периоды максимального объёма зелёной массы растительности (Миклашевич и др., 2019).

Широко применяются для определения запаса древесины в лесах зимние спутниковые изображения при наличии снежного покрова на земной поверхности. Выполненные ранее исследования показали информативность данных такого рода для оценки запасов древесины в лесных экосистемах на всех уровнях пространственного охвата от локальных экспериментов по данным высокого пространственного разрешения (10–30 м) до региональной оценки и многолетнего национального мониторинга по данным среднего пространственного разрешения (100–250 м) (Zharko et al., 2020).

Значительно чаще для картографирования наземной биомассы ВБУ применяются данные высокого пространственного разрешения (Mahdianpari et al., 2020). При этом преобладает использование эмпирических зависимостей КСЯ (коэффициент спектральной яркости)

и ВИ с определяемыми в натуральных условиях показателями проективного покрытия и биомассы растительности (Tan et al., 2003). Подобный подход использовался для мангров Танзании (Fatoyinbo et al., 2008), болот Западной Сибири (Peregon et al., 2008), речных долин Дальнего Востока (Li et al., 2021), различных типов ВБУ США, прибрежных ВБУ Индонезии (Aslan et al., 2016), тростниковых сообществ Франции (Poulin et al., 2010), дельты р. Хуанхэ (Chen et al., 2022) и в других исследованиях. При наличии известных соотношений между надземной и подземной биомассой для растительных сообществ возможно определение по спутниковым данным и фитомассы корней (O'Connell et al., 2015). Для повышения точности картографирования надземной биомассы тростниковых сообществ рекомендуется совместное использование оптических и радарных спутниковых данных. В работе (Zhao et al., 2022) за счёт использования данных Sentinel-1, -2 достигнута точность 89 % при картографировании надземной биомассы тростников в Китае с помощью алгоритма «случайный лес».

Данные BIOMASAR, полученные в результате применения одноимённого алгоритма (Santoro et al., 2010) для обработки данных разновременных радиолокационных измерений прибором ASAR (*англ.* Advanced Synthetic Aperture Radar), установленным на спутнике Envisat (*англ.* Environmental Satellite), характеризуют пространственное распределение запаса стволовой древесины ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) бореальных лесов в Евразии и Северной Америке с разрешением порядка 1 км по состоянию на 2010 г. Карта находится в свободном доступе (<http://biomasar.org/index.php?id=71>) и сопровождается информацией о величине погрешности (*англ.* uncertainty) оценки запаса, обусловленной использованной моделью, что позволяет анализировать достоверность данных для каждого пикселя.

Спутниковые лидарные данные, получаемые, например, такими приборами, как ATLAS (*англ.* Advanced Topographic Laser Altimeter System) и GEDI (*англ.* Global Ecosystem Dynamics Investigation), позволяют выполнять прямые измерения вертикальной структуры растительного покрова на больших территориях. В работе С. А. Барталева с соавторами (2022) рассмотрены возможности использования стандартного продукта ATL08 данных прибора ATLAS, установленного на спутнике ICESat-2, для оценки характеристик высоты и продуктивности лесов России. Исследование достоверности продукта ATL08 на локальном уровне (таксационные выделы) включало актуализацию данных наземных обследований на основе моделей хода роста насаждений, а также спутниковую оценку средней высоты леса и показателей её неопределённости с учётом точности исходных лидарных измерений и неоднородности лесного покрова. Локальная оценка достоверности данных ATL08 показала согласованность наземных и спутниковых измерений средней высоты лесов на уровне  $R^2 = 0,67$  и  $\text{RMSE} = 3,79$  м. Исследования на национальном уровне позволили рассмотреть примеры возможного использования сформированного набора данных в задачах изучения высоты и продуктивности лесов России.

Использование данных TanDEM-X (TDX) для анализа высоты мангровых зарослей продемонстрировало достаточно высокую точность в сравнении с результатами лидарных воздушных съёмки речных дельт в Мексике и Мозамбике. Результаты одно- и двухполярной инверсии показали наличие высокого коэффициента корреляции (0,85–0,92) и низкой среднеквадратической ошибки при определении высоты мангровых деревьев (1,07–1,73 м). Общая точность оценки высоты мангровых зарослей в X-диапазоне может достигать 90 % (Lee, Fatoyinbo, 2015).

Применение радарных данных Radarsat для оценки биомассы мангровых ВБУ с помощью генетических алгоритмов показало более высокую точность по сравнению с оптическими данными Landsat (Liu Y. et al., 2019). Для установления связи между данными дистанционного зондирования и биомассой водно-болотных угодий использовались регрессионные и аналитические модели. Было выявлено, что модели, использующие данные Radarsat, имеют значительно меньшую ошибку в оценке биомассы по сравнению с NDVI по данным Landsat. На примере редколесий *Picea mariana* было показано, что оценка проективного покрытия древесного полога по данным Radarsat возможна только при достаточно высокой влажности почвы, что характерно для ВБУ (Magagi et al., 2002). Свойства растительности более точно определяются на затопляемых территориях, вероятно, потому что водная подстилающая

поверхность значительно менее изменчива по сравнению с другими типами земного покрова (Townsend, 2002). Сравнительный анализ одно- и двухчастотных радиолокационных данных из разных источников (TerraSAR-X, Radarsat-2, ALOS-PALSAR с двойной и четверной поляризацией), проведенный в пойме р. Амазонки, показал, что ALOS/PALSAR обеспечивают наилучшие оценки как для LAI, так и для наземной биомассы (Pereira et al., 2018).

Использование радиолокационных данных для оценки наземной биомассы растительности основывается на тех же принципах, что и при применении оптических систем ДЗЗ: опорные данные, получаемые с помощью выборочных наземных измерений, аэрофотосъемки или лазерного сканирования сопоставляются со спутниковыми изображениями. После чего разрабатываются модели пересчета спутниковых измерений отражательных характеристик в показатели биомассы растительности: высоту, запас древесины, фитомассу и т.п. Наиболее важным преимуществом радарных данных перед оптическими представляется чувствительность к биомассе растительности, когда полог находится над поверхностью воды или водонасыщенной почвой, в условиях насыщения сигнала оптического диапазона, а также возможность получения данных при наличии облачного покрова и независимо от освещенности (Moreau et al., 2003). Существенным недостатком многолетнего архива радарных данных большой исторической глубины выступает их неоднородность, связанная с различиями в характеристиках съёмочных систем: пространственном и временном разрешении, диапазонах длин волн и измерениях при различной поляризации электромагнитного излучения.

## Заключение

Развитие возможностей широкомасштабного спутникового картографирования ВБУ на национальном уровне в качестве одного из первоочередных вопросов требует выработки оптимальной для решения данной задачи классификации типов водно-болотных угодий. Существующие классификации либо недостаточно детальны (1–3 класса), либо избыточны, так как содержат десятки типов ВБУ, как правило, недоступных для распознавания в полном объёме по данным ДЗЗ. Различные информационные продукты типов земного покрова низкого (Global Land Cover 2000), среднего (GlobCover2009, Copernicus Land Cover, EarthEnv Global 1-km Consensus Land Cover) и высокого (GLC30, FROM-GLC10, ESRI, ESA WorldCover) пространственного разрешения не обеспечивают необходимую тематическую детальность при картографировании типов ВБУ. Поэтому разработка карт ВБУ России, отвечающих их ландшафтным особенностям, является актуальной задачей. Система классификации должна учитывать наличие древесного яруса (облесённые болота — рямы и согры, заливаемые пойменные леса), поверхностного заливания, характеристику живого напочвенного покрова (кустарнички, травы и мхи), также должны выделяться ВБУ тростникового и аналогичных типов.

Методы определения наземной биомассы растительности ВБУ используют все источники данных ДЗЗ: материалы аэросъёмки, спутниковой съёмки различного пространственного разрешения, в том числе получаемые радарными и лидарными системами. Наиболее распространены методы картографирования фитомассы на основе комбинации данных различного пространственного разрешения о спектрально-отражательных характеристиках, а также выборочных наземных измерений продуктивности, проективного покрытия травянистой растительности, запаса и высоты лесов. Применение радарных данных несёт существенные преимущества в связи с их независимостью от наличия облачности и уровня освещенности, в то же время на получаемые с их использованием результаты существенно влияет влажность почвы и наличие водной поверхности. Тем не менее для разработки автоматизированных систем мониторинга радарные данные подходят в меньшей степени, так как для построения непрерывного многолетнего ряда данных требуется использование материалов съёмки разными спутниковыми системами, имеющими существенные различия в характеристиках аппаратуры (диапазон длин волн, поляризация излучения, временное и пространственное разрешение). По этой причине для широкомасштабного мониторинга фитомассы лучше подходят

данные среднего пространственного разрешения, например MODIS, имеющие значительную историческую глубину архива однородных данных на всю территорию России. При этом калибровка указанных данных среднего пространственного разрешения может осуществляться на основе наземных измерений, оптических и радарных данных высокого пространственного разрешения.

Исследование выполнено в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1229 (13.2251.21.0179) «Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий. HPC and BigData applied to co-designing cost-efficient automation for large scale wetland biomonitoring».

## Литература

1. Бармин А. Н., Голуб В. Б. Поучительный урок результатов эксплуатации тростниковых зарослей в дельте реки Волги // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2000. Т. 2. № 2. С. 295–299.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лурия Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Барталев С. А., Стыщенко Ф. Б., Хвостиков С. А., Лурия Е. А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
4. Барталев С. А., Богодухов М. А., Жарко В. О., Сидоренков В. М. Исследование возможностей использования данных ICESat-2 для оценки высоты лесов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 195–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
5. Берденгалиева А. Н. Анализ горимости пойменных ландшафтов нижней Волги по данным информационных продуктов спутникового детектирования активного горения и выгоревших площадей // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 346–358. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-346-358.
6. Вомперский С. Э., Сирин А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А., Майков Д. А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. Российской акад. наук. Сер. географическая. 2005. № 5. С. 39–50.
7. Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Мелентьева Н. В. Запасы углерода в экосистемах болот // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ВЦ СО РАН, 1994. С. 128–139.
8. Кривенко В. Г., Виноградов В. Г. Введение // Водно-болотные угодья России. Т. 3. Водно-болотные угодья, внесенные в Перспективный список Рамсарской конвенции / Wetlands International; отв. ред. В. Г. Кривенко. М.: Домино, 2000. 490 с. С. 11–21.
9. Кудеяров В. Н., Заварзин Г. А., Благодатский С. А., Борисов А. В., Воронин П. Ю., Демкин В. А., Демкина Т. С., Евдокимов И. В., Замолотчиков Д. Г., Карелин Д. В., Комаров А. С., Курганова И. Н., Ларионова А. А., Лопес де Гереню В. О., Уткин А. И., Чертов О. Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. 2007. М.: Наука, 315 с.
10. Медведев А. А., Тельнова Н. О., Кудиков А. В., Алексеенко Н. А. Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 150–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
11. Медведева М. А., Возбранная А. Е., Сирин А. А., Маслов А. А. Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 150–159. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.
12. Медведева М. А., Макаров Д. А., Сирин А. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
13. Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Сове-

- менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
14. Романова Е. А., Быбина Р. Т., Голицина Е. Ф., Иванова Г. М., Усова Л. И., Трушников Л. Г. Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. Л.: ГУГК, 1977. 500 с.
  15. Сабреков А. Ф., Филиппов И. В., Глаголев М. В., Терентьева И. Е., Ильясов Д. В., Коцюрбенко О. Р., Максюттов Ш. Ш. Эмиссия метана тростниковыми болотами лесостепи и подтайги Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 53–59.
  16. Сиринов А. А., Маслов А. А., Валяева Н. А., Цыганова О. П., Глухова Т. В. Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
  17. Терентьева И. Е., Филиппов И. В., Сабреков А. Ф. и др. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Изв. Российской академии наук. Сер. географическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 920–930. DOI: 10.31857/S2587556620060102.
  18. Шинкаренко С. С., Васильченко А. А. Современное состояние нерестилищ нижнего Дона по данным дистанционного зондирования // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2023. № 1. С. 16–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.2.
  19. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Выприцкий А. А. Динамика площадей водоемов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
  20. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Иванов Н. М. Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
  21. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Богодухов М. А. и др. Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 119–135. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.
  22. Adeli S., Salegi B., Mahdianpari M. et al. Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 2190. DOI: 10.3390/rs12142190.
  23. Allen T. R., Wang Y., Gore B. Coastal wetland mapping combining multi-date SAR and LiDAR // Geocarto Intern. 2013. V. 28. P. 616–631. DOI: 10.1080/10106049.2013.768297.
  24. Arino O., Ramos P., Jose J. et al. Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009) / European Space Agency, Université catholique de Louvain (UCL). PANGAEA, 2012. DOI: 10.1594/PANGAEA.787668.
  25. Aslan A. M., Rahman A. F., Warren M. W., Robenson S. M. Mapping spatial distribution and biomass of coastal wetland vegetation in Indonesian Papua by combining active and passive remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 183. P. 65–81. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.026.
  26. Baier S., Corti Meneses N., Geist J., Schneider T. Assessment of Aquatic Reed Stands from Airborne Photogrammetric 3K Data // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 337. DOI: 10.3390/rs14020337.
  27. Baird A., Belyea L., Comas X., Reeve A. S., Slater L. D. Carbon cycling in Northern Peatlands. Geophysical Monograph Ser. AGU, 2013. V. 184. 297 p.
  28. Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 9. P. 1977–1982.
  29. Bartholome E., Belward A., Frederic A., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Fritz S., Gregoire J. M., Mayaux P., Stibig H.-J. E. E. GLC 2000: Global Land Cover Mapping for the Year 2000: Project Status November 2002. 2002. 67 p.
  30. Bontemps S., Boettcher M., Brockmann C., Kirches G., Lamarche C., Radoux J., Santoro M., Vanbogaert E., Wegmuller U., Herold M., Achard F., Ramoino F., Arino O., Defourny P. Multi-year global land cover mapping at 300 m and characterization for climate modelling: achievements of the Land Cover component of the ESA Climate Change Initiative // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. V. XL-7/W3. P. 323–328.
  31. Chasmer L., Cobbaert D., Mahoney C. et al. (2020a) Remote Sensing of Boreal Wetlands 1: Data Use for Policy and Management // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 8. Article 1320. DOI: 10.3390/rs12081320.
  32. Chasmer L., Mahoney C., Millard K. et al. (2020b) Remote Sensing of Boreal Wetlands 2: Methods for Evaluating Boreal Wetland Ecosystem State and Drivers of Change // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 8. Article 1321. DOI: 10.3390/rs12081321.
  33. Chen C., Ren G., Wang J. Aboveground biomass of salt-marsh vegetation in coastal wetlands: Sample expansion of in situ hyperspectral and Sentinel-2 data using a generative adversarial network // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 270. Article 112885. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112885.
  34. Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map // Nature. 2014. V. 514. No. 7523. Article 434. DOI: 10.1038/514434c.

35. *Chen Y., Huang C., Ticehurst C. et al.* An evaluation of MODIS daily and 8-day composite products for floodplain and wetland inundation mapping // *Wetlands*. 2013. V. 33. P. 823–835. DOI: 10.1007/s13157-013-0439-4.
36. *Chuvienco E., Pettinari M. L., Lizundia-Loiola J., Storm T., Padilla Parellada M.* ESA Fire Climate Change Initiative (Fire\_cci): MODIS Fire\_cci Burned Area Pixel product, version 5.1. Centre for Environmental Data Analysis. 2018. DOI: 10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537.
37. *Corti Meneses N., Brunner F., Baier S. et al.* Quantification of Extent, Density, and Status of Aquatic Reed Beds Using Point Clouds Derived from UAV–RGB Imagery // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 12. Article 1869. DOI: 10.3390/rs10121869.
38. *Ding Y., Yang X., Wang Z. et al.* A Field-Data-Aided Comparison of Three 10 m Land Cover Products in Southeast Asia // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 19. Article 5053. DOI: 10.3390/rs14195053.
39. *Doughty C. L., Cavanaugh K. C.* Mapping Coastal Wetland Biomass from High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Article 540. DOI: 10.3390/rs11050540.
40. *Doughty C. L., Ambrose R. F., Okin G. S., Cavanaugh K. C.* Characterizing spatial variability in coastal wetland biomass across multiple scales using UAV and satellite imagery // *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 2021. V. 7. P. 411–429. DOI: 10.1002/rse2.198.
41. *Dronova I.* Object-Based Image Analysis in Wetland Research: A Review // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. No. 5. P. 6380–6413. DOI: 10.3390/rs70506380.
42. *Dronova I., Kislik C., Dinh Z., Kelly M.* A Review of Unoccupied Aerial Vehicle Use in Wetland Applications: Emerging Opportunities in Approach, Technology, and Data // *Drones*. 2021. V. 5. No. 2. Article 45. DOI: 10.3390/drones5020045.
43. *Dugan P.* *Wetlands in Danger: A World Conservation Atlas*. N. Y., USA: Oxford Univ. Press, 1993. 192 p.
44. *Dugdale S. J., Malcolm I. A., Hannah D. M.* Drone-based Structure-from-Motion provides accurate forest canopy data to assess shading effects in river temperature models // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 678. P. 326–340. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.229.
45. *Dutta D., Das P. K., Paul S., Sharma J. R., Dadhwal V. K.* Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001–2011) // *Natural Hazards*. 2015. V. 79. P. 775–790. DOI: 10.1007/s11069-015-1872-x.
46. *Dyukarev E. A., Alekseeva M. N., Golovatskaya E. A.* Study of Wetland Ecosystem Vegetation Using Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. P. 1029–1041. DOI: 10.1134/S0001433817090092.
47. *Fatoyinbo T. E., Marc S., Washington-Allen R. A., Shugart H. H.* Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique’s mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008. V. 113. P. 1–13. DOI: 10.1029/2007JG000551.
48. *Fernandes M. R., Aguiar F. C., Martins M. J. et al.* Carbon Stock Estimations in a Mediterranean Riparian Forest: A Case Study Combining Field Data and UAV Imagery // *Forests*. 2020. V. 11. Article 376. DOI: 10.3390/f11040376.
49. *Finlayson C. M., Spiers N. C.* *Global Review of Wetland Resources and Priorities for Wetland Inventory, Supervising Scientist Report 144*. Canberra, Australia: Supervising Scientist, 1999. 524 p.
50. *Flores-de-Santiago F., Valderrama-Landeros L., Rodríguez-Sobreyra R., Flores-Verdugo F.* Assessing the Effect of Flight Altitude and Overlap on Orthoimage Generation for UAV Estimates of Coastal Wetlands // *J. Coastal Conservation*. 2020. V. 24. Article 35. DOI: 10.1007/s11852-020-00753-9.
51. *Fournier R. A., Grenier M., Lavoie A., Hélie R.* Towards a strategy to implement the Canadian Wetland Inventory using satellite remote sensing // *Canadian J. Remote Sensing*. 2007. V. 33. Article 16. DOI: 10.5589/m07-051.
52. *Friedl M. A., McIver D. K., Hodges J. C. F. et al.* Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. P. 287–302. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
53. *Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D.* MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MCD64A1.006.
54. *Giglio L., Boschetti L., David P. R., Humber M. L., Justice C. O.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 217. P. 72–85. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
55. *Gong P., Liu H., Zhang M. et al.* Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 // *Science Bull.* 2019. V. 64. Iss. 6. P. 370–373. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
56. *Gray P., Ridge J., Poulin S. et al.* Integrating drone imagery into high resolution satellite remote sensing assessments of estuarine environments // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Article 1257. DOI: 10.3390/rs10081257.

57. Guo M., Li J., Wen L., Huang S. Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions from Wildfires Using OCO-2 Data // Atmosphere. 2019. V. 10. Article 581. DOI: 10.3390/atmos10100581.
58. Hayasaka H., Sokolova G. V., Ostroukhov A., Naito D. Classification of Active Fires and Weather Conditions in the Lower Amur River Basin // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 3204. DOI: 10.3390/rs12193204.
59. Henderson F. M., Lewis A. J. Radar detection of wetland ecosystems: a review // Intern. J. Remote Sensing. 2015. V. 29. No. 20. P. 5809–5835. DOI: 10.1080/01431160801958405.
60. Hong S.-H., Wdowinski S. Multitemporal Multitrack Monitoring of Wetland Water Levels in the Florida Everglades Using ALOS PALSAR Data With Interferometric Processing // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. V. 11. P. 1355–1359. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2293492.
61. Huang C., Peng Y., Lang M., Yeo I. Y., Mccarty G. Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 141. P. 231–242. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.020.
62. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 4704–4707. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
63. Kuzmina Zh. V., Treshkin S. E., Shinkarenko S. S. Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 4. P. 231–244. DOI: 10.1134/S2079096118040066.
64. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A. Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 4. P. 226–236. DOI: 10.1134/S207909611904005X.
65. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Markov M. L. The Effects of River Control and Climatic and Hydrological Changes on the State of Floodplain and Delta Ecosystems of the Lower Don // Arid Ecosystems. 2022. V. 12. No. 4. P. 361–373. DOI: 10.1134/S2079096122040126.
66. Lee H., Yuan T., Jung H. C., Beighley E. Mapping wetland water depths over the central Congo Basin using PALSAR ScanSAR, Envisat altimetry, and MODIS VCF data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 159. P. 70–79. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.030.
67. Lee S.-K., Fatoyinbo T. E. TanDEM-X Pol-InSAR Inversion for Mangrove Canopy Height Estimation // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. P. 3608–3618. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2431646.
68. Lee Y.-K., Park J.-W., Choi J.-K. et al. Potential uses of TerraSAR-X for mapping herbaceous halophytes over salt marsh and tidal flats // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2012. V. 115. P. 366–376. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.10.003.
69. Lehner B., Doll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // J. Hydrology. 2004. V. 296. Iss. 1. No. 4. P. 1–22. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.
70. Li C., Zhou L., Xu W. Estimating Aboveground Biomass Using Sentinel-2 MSI Data and Ensemble Algorithms for Grassland in the Shengjin Lake Wetland, China // Remote Sensing. 2021. V. 13. Article 1595. DOI: 10.3390/rs13081595.
71. Li X., Xiao J. A Global 0.05-Degree Product of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Derived from OCO-2, MODIS, and Reanalysis Data // Remote Sensing. 2019. V. 11. Article 517. DOI: 10.3390/rs11050517.
72. Liu T., Abd-Elrahman A., Dewitt B. et al. Evaluating the Potential of Multi-View Data Extraction from Small Unmanned Aerial Systems (UASs) for Object-Based Classification for Wetland Land Covers // GIScience and Remote Sensing. 2019. V. 56. P. 130–159. DOI: 10.1080/15481603.2018.1495395.
73. Liu Y., Gong W., Xing Y. et al. Estimation of the forest stand mean height and aboveground biomass in Northeast China using SAR Sentinel-1B, multispectral Sentinel-2A, and DEM imagery // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. V. 151. P. 277–289. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.016.
74. Long T., Zhang Z., He G. et al. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // Remote Sensing. 2019. No. 11. Article 489. DOI: 10.3390/rs11050489.
75. Loveland T. R., Belward A. S. The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover: First results // Intern. J. Remote Sensing. 1997. V. 18. No. 15. P. 3289–3295. DOI: 10.1080/014311697217099.
76. Loveland T. R., Merchant J. W., Ohlen D. O., Brown J. F. Development of a Land-Cover Characteristics Database for the Conterminous U.S. // Photogrammetric Engineering Remote Sensing. 1991. V. 57. P. 1453–1463.
77. Lu L., Luo J., Xin Y. et al. How can UAV contribute in satellite-based Phragmites australis aboveground biomass estimating? // Intern. J. Applied Earth Observations and Geoinformation. 2022. V. 114. Article 103024. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103024.
78. Lucas R. M., Mitchell A. L., Rosenqvist A. et al. The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: Case studies from the tropics // Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems. 2007. V. 17. P. 245–264. DOI: 10.1002/aqc.833.

79. *Lumbierres M., Méndez P.F., Bustamante J. et al.* Modeling Biomass Production in Seasonal Wetlands Using MODIS NDVI Land Surface Phenology // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Article 392. DOI: 10.3390/rs9040392.
80. *Magagi R., Bernier M., Ung C.H.* Quantitative analysis of RADARSAT SAR data over a sparse forest canopy // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2002. V. 40. P. 1301–1313. DOI: 10.1109/TGRS.2002.800235.
81. *Mahdavi S., Salehi B., Granger J. et al.* Remote sensing for wetland classification: a comprehensive review // *GIScience and Remote Sensing*. 2018. V. 55. No. 5. P. 623–658. DOI: 10.1080/15481603.2017.1419602.
82. *Mahdianpari M., Granger J.E., Mohammadimanesh F. et al.* Meta-Analysis of Wetland Classification Using Remote Sensing: A Systematic Review of a 40-Year Trend in North America // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 11. Article 1882. DOI: 10.3390/rs12111882.
83. *Mayaux P., Bartholome E., Massart M., van Cutsem C., Cabral A., Nonguierma A., Diallo O., Pretorius C., Thompson M., Cherlet M.* A Land Cover Map of Africa. Luxembourg: European Communities, 2003.
84. *Mirmazloumi S.M., Moghimi A., Ranjgar B. et al.* Status and Trends of Wetland Studies in Canada Using Remote Sensing Technology with a Focus on Wetland Classification: A Bibliographic Analysis // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 20. Article 4025. DOI: 10.3390/rs13204025.
85. *Mitsch W.J., Gosselink J.G.* Wetlands. 4<sup>th</sup> ed. N.Y., USA: Wiley, 2007. 600 p.
86. *Mizuochi H., Hiyama T., Ohta T., Nasahara K.* Evaluation of the surface water distribution in North-Central Namibia based on MODIS and AMSR series // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 7660–7682. DOI: 10.3390/rs6087660.
87. *Moreau S., Bosseno R., Gu X.F., Baret F.* Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and to-tora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 85. P. 516–529. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00053-1.
88. *Morgan G.R., Wang C., Morris J.T.* RGB Indices and Canopy Height Modelling for Mapping Tidal Marsh Biomass from a Small Unmanned Aerial System // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 3406. DOI: 10.3390/rs13173406.
89. *Navarro A., Young M., Allan B. et al.* The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate aboveground biomass of mangrove ecosystems // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 242. Article 111747. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111747.
90. *Niu B., He Y., Zhang X. et al.* Tower-Based Validation and Improvement of MODIS Gross Primary Production in an Alpine Swamp Meadow on the Tibetan Plateau // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. Article 592. DOI: 10.3390/rs8070592.
91. *O'Connell J.L., Byrd K.B., Kelly M.* A Hybrid Model for Mapping Relative Differences in Belowground Biomass and Root: Shoot Ratios Using Spectral Reflectance, Foliar N and Plant Biophysical Data within Coastal Marsh // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. P. 16480–16503. DOI: 10.3390/rs71215837.
92. *Ordoyne C., Friedl M.A.* Using MODIS data to characterize seasonal inundation patterns in the Florida Everglades // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. P. 4107–4119. DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.027.
93. *Ostroukhov A., Klimina E., Kuptsova V., Naito D.* Estimating Long-Term Average Carbon Emissions from Fires in Non-Forest Ecosystems in the Temperate Belt // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 5. Article 1197. DOI: 10.3390/rs14051197.
94. *Page S.E., Siegert F., Rieley J.O. et al.* The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 // *Nature*. 2002. V. 420. P. 61–65. DOI: 10.1038/nature01131.
95. *Pashaei M., Kamangir H., Starek M.J., Tissot P.* Review and Evaluation of Deep Learning Architectures for Efficient Land Cover Mapping with UAS Hyper-Spatial Imagery: A Case Study Over a Wetland // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 959. DOI: 10.3390/rs12060959.
96. *Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P.* Map-based inventory of wetland biomass and Net Primary Production in Western Siberia // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008. V. 113. P. 168–182. DOI: 10.3390/rs12060959.
97. *Pereira L.O., Furtado L.F.A., Novo E.M.L.M. et al.* Multifrequency and Full-Polarimetric SAR Assessment for Estimating Above Ground Biomass and Leaf Area Index in the Amazon Várzea Wetlands // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Article 1355. DOI: 10.3390/rs10091355.
98. *Plank S., Jüssi M., Martinis S., Twele A.* Mapping of flooded vegetation by means of polarimetric Sentinel-1 and ALOS-2/PALSAR-2 imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 2017. V. 38. P. 3831–3850. DOI: 10.1080/01431161.2017.1306143.
99. *Poulin B., Davranche A., Lefebvre G.* Ecological assessment of Phragmites australis wetlands using multi-season SPOT-5 scenes // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 1602–1609. DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.014.
100. *Poulter B., Christensen N.L., Halpin P.N.* Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2006. V. 111. P. 907–923.

101. *Qiu R., Han G., Ma X. et al.* A Comparison of OCO-2 SIF, MODIS GPP, and GOSIF Data from Gross Primary Production (GPP) Estimation and Seasonal Cycles in North America // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 258. DOI: 10.3390/rs12020258.
102. *Rapinel S., Hubert-Moy L., Clement B.* Combined use of LiDAR data and multispectral earth observation imagery for wetland habitat mapping // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. V. 37. P. 56–64. DOI: 10.1016/j.jag.2014.09.002.
103. *Rappold A. G., Stone S. L., Cascio W. E. et al.* Peat bog wildfire smoke exposure in rural North Carolina is associated with cardiopulmonary emergency department visits assessed through syndromic surveillance // *Environmental Health Perspectives*. 2011. V. 119. P. 1415–1420. DOI: 10.1289/ehp.1003206.
104. *Rocha A. V., Goulden M. L.* Why Is Marsh Productivity so High? New Insights from Eddy Covariance and Biomass Measurements in a Typha Marsh // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2009. V. 149. P. 159–168. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.07.010.
105. *Santoro M., Beer C., Cartus O., Schmullius C., Shvidenko A., McCallum I., Wegmueller U., Wiesmann A.* The BIOMASAR algorithm: An approach for retrieval of forest growing stock volume using stacks of multi-temporal SAR data // *Proc. ESA Living Planet Symp. 28 June – 2 July 2010*. 2010. V. 28.
106. *Shang W., Gao Z., Jiang X., Chen M.* The Extraction of Wetland Vegetation Information Based on UAV Remote Sensing Images // *Proc. Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XV / eds. Gao W., Chang N.-B., Wang J.* San Diego, CA, USA: SPIE, 2018, 38 p.
107. *Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M.* A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbonpool // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. V. 18. Article GB3004. DOI: 10.1029/2003GB002190.
108. *Shvidenko A., Schepaschenko D., Vaganov E. et al.* Impacts of vegetation fire in Russian territories on ecosystems and global carbon budget in 1998–2010 // *Doklady Earth Science*. 2011. V. 441. P. 1678–1682. DOI: 10.1134/S1028334X11120075.
109. *Sirin A., Medvedeva M.* Remote Sensing Mapping of Peat-Fire-Burnt Areas: Identification among Other Wildfires // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 194. DOI: 10.3390/rs14010194.
110. *Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S.* Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin // *Water Resources*. 2020. V. 47. No. 6. P. 719–728. DOI: 10.1134/S0097807820060135.
111. *Stone T. A., Schlesinger P., Houghton R. A., Woodwell G. M.* A Map of the Vegetation of South America Based on Satellite Imagery // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1994. V. 60. P. 541–551.
112. *Tan Q., Shao Y., Yang S., Wei Q.* Wetland vegetation biomass estimation using Landsat-7 ETM+data // *Proc. 2003 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'03)*. Toulouse, France, 21–25 July 2003. 2003. P. 2629–2631.
113. *Tao J., Mishra D. R., Cotton D. L. et al.* A Comparison between the MODIS Product (MOD17A2) and a Tide-Robust Empirical GPP Model Evaluated in a Georgia Wetland // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Article 1831. DOI: 10.3390/rs10111831.
114. *Terent'eva I. E., Sabrekov A. F., Glagolev M. V. et al.* A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide // *Water Resources*. 2017. V. 44. No. 2. P. 297–307. DOI: 10.1134/S0097807817020154.
115. *Toriyama J., Takahashi T., Nishimura S. et al.* Estimation of fuel mass and its loss during a forest fire in peat swamp forests of central Kalimantan, Indonesia // *Forest Ecology and Management*. 2014. V. 314. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.11.034.
116. *Townsend P. A.* Estimating forest structure in wetlands using multitemporal SAR. *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 79. P. 288–304. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00280-2.
117. *Tuanmu M. N., Jetz W.* A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modeling // *Global Ecology and Biogeography*. 2014. V. 23. No. 9. P. 1031–1045. DOI: 10.1111/geb.12182/abstract.
118. *Wang D., Wan B., Liu J. et al.* Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in China using an upscaling method from field plots, UAV-LiDAR data and Sentinel-2 imagery // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. V. 85. Article 101986. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101986.
119. *White L., Brisco B., Dabboor M. et al.* A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. No. 6. P. 7615–7645. DOI: 10.3390/rs70607615.
120. *White M. A., Thornton P. E., Running S. W., Nemani R. R.* Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls // *Earth Interactions*. 2000. V. 4. No. 3. P. 1–85. DOI: 10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2.
121. *Wohlfart C., Winkler K., Wendleder A., Roth A.* TerraSAR-X and Wetlands: A Review // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Article 916. DOI: 10.3390/rs10060916.
122. *Xu T., Weng B., Yan D. et al.* Wetlands of International Importance: Status, Threats, and Future Protection // *Intern. J. Environmental Research and Public Health*. 2019. V. 16. Article 1818. DOI: 10.3390/ijerph16101818.

123. Zanağa D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
124. Zhang W., Gao F., Jiang N. et al. High-Temporal-Resolution Forest Growth Monitoring Based on Segmented 3D Canopy Surface from UAV Aerial Photogrammetry // Drones. 2022. V. 6. No. 7. Article 158. DOI: 10.3390/drones6070158.
125. Zhang W., Liu L., Zhao T. et al. GWL\_FCS30: a global 30 m wetland map with a fine classification system using multi-sourced and time-series remote sensing imagery in 2020 // Earth System Science Data. 2023. V. 15. Iss. 1. P. 265–293. DOI: 10.5194/essd-15-265-2023.
126. Zhao Y., Mao D., Zhang D. et al. Mapping Phragmites australis Aboveground Biomass in the Momoge Wetland Ramsar Site Based on Sentinel-1/2 Images // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 694. DOI: 10.3390/rs14030694.
127. Zharko V. O., Bartalev S. A., Sidorenkov V. M. Forest growing stock volume estimation using optical remote sensing over snow-covered ground: a case study for Sentinel-2 data and the Russian Southern Taiga region // Remote Sensing Letters. 2020. V. 11. Iss. 7. P. 677–686. DOI: 10.1080/2150704X.2020.1755473.

## Application of remote sensing data in large-scale monitoring of wetlands

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

The present review examines existing technologies for mapping wetland ecosystems (WE) based on remote sensing data. WEs are valuable ecosystems with significant conservation importance. There are numerous classifications of WEs, encompassing dozens of types. However, existing global or national-level WE maps typically do not consider their landscape specificity and are limited to only a few classes. Peatlands, swamp forests, high-productivity meadows, and riparian vegetation formations store substantial carbon reserves, which are released due to fires. The intensity of these fires has been increasing in recent years as a result of climate change. These issues necessitate the development of new large-scale monitoring methods for assessing the state of WEs, including mapping their types, determining biomass and carbon stocks, assessing the consequences of landscape fires, and evaluating greenhouse gas emissions and other combustion byproducts. First and foremost, it is necessary to develop a classification system for Russia's WEs that considers their landscape diversity while being sufficiently generalized for satellite monitoring and annual updating of WE maps. Various remote sensing data types, including aerial imagery, lidar, and radar data, are used for WE mapping. The most promising direction for the development of WE monitoring technologies at the national level involves the use of long-term homogeneous time series data from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), in combination with ground-based calibration measurements and high-resolution satellite optical and radar data.

**Keywords:** wetlands, remote sensing, landscape fires, biomass, mapping

Accepted: 16.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34

## References

1. Barmin A. N., Golub V. B., Instructive lesson of results of reed thickets operation in the Volga river delta, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2000, Vol. 2, No. 2, pp. 295–299 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).

3. Bartalev S. A., Stytsenko F. B., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
4. Bartalev S. A., Bogodukhov M. A., Zharko V. O., Sidorenkov V. M., Investigation of ICESat-2 data capabilities for forest height estimation over Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 195–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
5. Berdengalieva A. N., Analysis of the lower Volga floodplain landscapes burning according to active fire and burnt areas satellite data, *InterCarto. InterGIS*, 2022, Vol. 28, No. 1, pp. 346–358 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-346-358.
6. Vomperskii S. E., Sirin A. A., Tsyganova O. P., Valyaeva N. A., Maikov D. A., Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. Geograficheskaya*, 2005, No. 5, pp. 39–50 (in Russian).
7. Efremov S. P., Efremova T. T., Melent'eva N. V., Carbon stocks in wetland ecosystems, *Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii*, Krasnoyarsk: VTs SO RAN, 1994, pp. 128–139 (in Russian).
8. Krivenko V. G., Vinogradov V. G., Introduction, *Wetlands in Russia, Volume 3. Wetlands on the Ramsar Shadow List*, Wetlands International, Krivenko V. G. (ed.), Moscow: Domino, 2000, pp. 11–21 (in Russian).
9. Kudeyarov V. N., Zavarzin G. A., Blagodatsky S. A., Borisov A. V., Voronin P. Yu., Demkin V. A., Demkina T. S., Evdokimov I. V., Zamolodchikov D. G., Karelin D. V., Komarov A. S., Kurganova I. N., Larionova A. A., Lopez de Gerenyu V. O., Utkin A. I., Chertov O. G., *Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* (Carbon Pools and Fluxes in Terrestrial Ecosystems of Russia), 2007, Moscow: Nauka, 315 p. (in Russian).
10. Medvedev A. A., Tel'nova N. O., Kudikov A. V., Alekseenko N. A., Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 150–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
11. Medvedeva M. A., Vozbrannaya A. E., Sirin A. A., Maslov A. A., Potential of different multispectral satellite data for monitoring abandoned fire hazardous peatlands and rewetting effectiveness, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 150–159 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.
12. Medvedeva M. A., Makarov D. A., Sirin A. A., Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 157–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
13. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
14. Romanova E. A., Bybina R. T., Golitsina E. F., Ivanova G. M., Usova L. I., Trushnikova L. G., *Tipologicheskaya karta bolot Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Typological map of swamps of the West Siberian Plain), Leningrad: GUGK, 1977, 500 p. (in Russian).
15. Sabrekov A. F., Filippov I. V., Glagolev M. V. et al., Methane emission from West Siberian forest-steppe and subtaiga reed fens, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, No. 1, pp. 37–42, DOI: 10.3103/S1068373916010052.
16. Sirin A. A., Maslov A. A., Valyaeva N. A., Tsyganova O. P., Glukhova T. V., Mapping of peatlands in the Moscow Oblast based on high-resolution remote sensing data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, No. 5, pp. 65–71, DOI: 10.1134/S1995425514070117.
17. Terent'eva I. E., Filippov I. V., Sabrekov A. F. et al., Western Siberia's taiga wetlands mapping based on remote sensing data, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 6, pp. 920–930 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556620060102.
18. Shinkarenko S. S., Vasil'chenko A. A., Actual state of the lower don spawning grounds according to remote sensing data, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2023, No. 1, pp. 16–27 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-16-27.
19. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Vypritskii A. A., Dynamics of water bodies areas in the Western Ilmen Lake Region of the Volga Delta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 285–290 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
20. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Ivanov N. M., Spatio-temporal analysis of burnt area in The Lower Volga floodplain, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 143–157 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
21. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Bogodukhov M. A. et al., The Lower Volga floodplain classification based on long-term hydrological and remote sensing data, *Sovremennye problemy distan-*

- tsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 119–135 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135
22. Adeli S., Salegi B., Mahdianpari M. et al., Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 2190, DOI: 10.3390/rs12142190.
  23. Allen T. R., Wang Y., Gore B., Coastal wetland mapping combining multi-date SAR and LiDAR, *Geocarto Intern.*, 2013, Vol. 28, pp. 616–631, DOI: 10.1080/10106049.2013.768297.
  24. Arino O., Ramos P., Jose J. et al., *Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009)*, European Space Agency, Université Catholique de Louvain (UCL), PANGAEA, 2012, DOI: 10.1594/PANGAEA.787668.
  25. Aslan A. M., Rahman A. F., Warren M. W., Robenson S. M., Mapping spatial distribution and biomass of coastal wetland vegetation in Indonesian Papua by combining active and passive remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 183, pp. 65–81, DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.026.
  26. Baier S., Corti Meneses N., Geist J., Schneider T., Assessment of Aquatic Reed Stands from Airborne Photogrammetric 3K Data, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 337, DOI: 10.3390/rs14020337.
  27. Baird A., Belyea L., Comas X., Reeve A. S., Slater L. D., *Carbon Cycling in Northern Peatlands*, Geophysical Monograph Ser., AGU, 2013, Vol. 184, 297 p.
  28. Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S., A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, pp. 1977–1982.
  29. Bartholome E., Belward A., Frederic A., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Fritz S., Gregoire J. M., Mayaux P., Stibig H.-J. E. E., *GLC 2000: Global Land Cover Mapping for the Year 2000: Project Status 2002*, 2002, 67 p.
  30. Bontemps S., Boettcher M., Brockmann C., Kirches G., Lamarche C., Radoux J., Santoro M., Vanbogaert E., Wegmuller U., Herold M., Achard F., Ramoino F., Arino O., Defourny P., Multi-year global land cover mapping at 300 m and characterization for climate modelling: achievements of the Land Cover component of the ESA Climate Change Initiative, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, Vol. XL-7/W3, pp. 323–328.
  31. Chasmer L., Cobbaert D., Mahoney C. et al. (2020a), Remote Sensing of Boreal Wetlands 1: Data Use for Policy and Management, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 8, Article 1320, DOI: 10.3390/rs12081320.
  32. Chasmer L., Mahoney C., Millard K. et al. (2020b), Remote Sensing of Boreal Wetlands 2: Methods for Evaluating Boreal Wetland Ecosystem State and Drivers of Change, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 8, Article 1321, DOI: 10.3390/rs12081321.
  33. Chen C., Ren G., Wang J., Aboveground biomass of salt-marsh vegetation in coastal wetlands: Sample expansion of in situ hyperspectral and Sentinel-2 data using a generative adversarial network, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 270, Article 112885, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112885.
  34. Chen J., Ban Y., Li S., China: Open access to Earth land-cover map, *Nature*, 2014, Vol. 514, No. 7523, Article 434, DOI: 10.1038/514434c.
  35. Chen Y., Huang C., Ticehurst C. et al., An evaluation of MODIS daily and 8-day composite products for floodplain and wetland inundation mapping, *Wetlands*, 2013, Vol. 33, pp. 823–835, DOI: 10.1007/s13157-013-0439-4.
  36. Chuvieco E., Pettinari M. L., Lizundia-Loiola J., Storm T., Padilla Parellada M., *ESA Fire Climate Change Initiative (Fire\_cci): MODIS Fire\_cci Burned Area Pixel product, version 5.1*, Centre for Environmental Data Analysis, 2018, DOI: 10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537.
  37. Corti Meneses N., Brunner F., Baier S. et al., Quantification of Extent, Density, and Status of Aquatic Reed Beds Using Point Clouds Derived from UAV–RGB Imagery, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 12, Article 1869, DOI: 10.3390/rs10121869.
  38. Ding Y., Yang X., Wang Z. et al., A Field-Data-Aided Comparison of Three 10 m Land Cover Products in Southeast Asia, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 19, Article 5053, DOI: 10.3390/rs14195053.
  39. Doughty C. L., Cavanaugh K. C., Mapping Coastal Wetland Biomass from High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Article 540, DOI: 10.3390/rs11050540.
  40. Doughty C. L., Ambrose R. F., Okin G. S., Cavanaugh, K. C., Characterizing spatial variability in coastal wetland biomass across multiple scales using UAV and satellite imagery, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2021, Vol. 7, pp. 411–429, DOI: 10.1002/rse2.198.
  41. Dronova I., Object-Based Image Analysis in Wetland Research: A Review, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 5, pp. 6380–6413, DOI: 10.3390/rs70506380.
  42. Dronova I., Kislik C., Dinh Z., Kelly M., A Review of Unoccupied Aerial Vehicle Use in Wetland Applications: Emerging Opportunities in Approach, Technology, and Data, *Drones*, 2021, Vol. 5, No. 2, Article 45, DOI: 10.3390/drones5020045.
  43. Dugan P., *Wetlands in Danger: A World Conservation Atlas*, N.Y., USA: Oxford University Press, 1993, 192 p.
  44. Dugdale S. J., Malcolm I. A., Hannah D. M., Drone-based Structure-from-Motion provides accurate forest canopy data to assess shading effects in river temperature models, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 678, pp. 326–340, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.229.

45. Dutta D., Das P.K., Paul S., Sharma J.R., Dadhwal V.K., Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001–2011), *Natural Hazards*, 2015, Vol. 79, pp. 775–790, DOI: 10.1007/s11069-015-1872-x.
46. Dyukarev E.A., Alekseeva M.N., Golovatskaya E.A., Study of Wetland Ecosystem Vegetation Using Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, pp. 1029–1041, DOI: 10.1134/S0001433817090092.
47. Fatoyinbo T.E., Marc S., Washington-Allen R.A., Shugart H.H., Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, Vol. 113, pp. 1–13, DOI: 10.1029/2007JG000551.
48. Fernandes M.R., Aguiar F.C., Martins M.J. et al., Carbon Stock Estimations in a Mediterranean Riparian Forest: A Case Study Combining Field Data and UAV Imagery, *Forests*, 2020, Vol. 11, Article 376, DOI: 10.3390/f11040376.
49. Finlayson C.M., Spiers N.C., *Global Review of Wetland Resources and Priorities for Wetland Inventory, Supervising Scientist Report 144*, Canberra, Australia: Supervising Scientist, 1999, 524 p.
50. Flores-de-Santiago F., Valderrama-Landeros L., Rodríguez-Sobreyra R., Flores-Verdugo F., Assessing the Effect of Flight Altitude and Overlap on Orthoimage Generation for UAV Estimates of Coastal Wetlands, *J. Coastal Conservation*, 2020, Vol. 24, Article 35, DOI: 10.1007/s11852-020-00753-9.
51. Fournier R.A., Grenier M., Lavoie A., Hélie R., Towards a strategy to implement the Canadian Wetland Inventory using satellite remote sensing, *Canadian J. Remote Sensing*, 2007, Vol. 33, Article 16, DOI: 10.5589/m07-051.
52. Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. et al., Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, pp. 287–302, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
53. Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D., *MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MCD64A1.006.
54. Giglio L., Boschetti L., David P.R., Humber M.L. Justice C.O., The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 217, pp. 72–85, DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
55. Gong P., Liu H., Zhang M. et al., Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017, *Science Bull.*, 2019, Vol. 64, Issue 6, pp. 370–373, DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
56. Gray P., Ridge J., Poulin S. et al., Integrating drone imagery into high resolution satellite remote sensing assessments of estuarine environments, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Article 1257, DOI: 10.3390/rs10081257.
57. Guo M., Li J., Wen L., Huang S., Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions from Wildfires Using OCO-2 Data, *Atmosphere*, 2019, Vol. 10, Article 581, DOI: 10.3390/atmos10100581.
58. Hayasaka H., Sokolova G.V., Ostroukhov A., Naito D., Classification of Active Fires and Weather Conditions in the Lower Amur River Basin, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 3204, DOI: 10.3390/rs12193204.
59. Henderson F.M., Lewis A.J., Radar detection of wetland ecosystems: a review, *Intern. J. Remote Sensing*, 2015, Vol. 29, No. 20, pp. 5809–5835, DOI: 10.1080/01431160801958405.
60. Hong S.-H., Wdowinski S., Multitemporal Multitrack Monitoring of Wetland Water Levels in the Florida Everglades Using ALOS PALSAR Data With Interferometric Processing, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 11, pp. 1355–1359, DOI: 10.1109/LGRS.2013.2293492.
61. Huang C., Peng Y., Lang M., Yeo I.Y., Mccarty G., Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 141, pp. 231–242, DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.020.
62. Karra K., Kontgis C, Statman-Weil Z. et al., Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning, *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2021, pp. 4704–4707, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
63. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E., Shinkarenko S.S., Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 4, pp. 231–244, DOI: 10.1134/S2079096118040066.
64. Kuzmina Zh.V., Shinkarenko S.S., Solodovnikov D.A., Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 226–236, DOI: 10.1134/S207909611904005X.
65. Kuzmina Zh.V., Shinkarenko S.S., Solodovnikov D.A., Markov M.L., The Effects of River Control and Climatic and Hydrological Changes on the State of Floodplain and Delta Ecosystems of the Lower Don, *Arid Ecosystems*, 2022, Vol. 12, No. 4, pp. 361–373, DOI: 10.1134/S2079096122040126.

66. Lee H., Yuan T., Jung H. C., Beighley E., Mapping wetland water depths over the central Congo Basin using PALSAR ScanSAR, Envisat altimetry, and MODIS VCF data, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 159, pp. 70–79, DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.030.
67. Lee S.-K., Fatoyinbo T. E., TanDEM-X Pol-InSAR Inversion for Mangrove Canopy Height Estimation, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, pp. 3608–3618, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2431646.
68. Lee Y.-K., Park J.-W., Choi J.-K. et al., Potential uses of TerraSAR-X for mapping herbaceous halophytes over salt marsh and tidal flats, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, Vol. 115, pp. 366–376, DOI: 10.1016/j.ecss.2012.10.003.
69. Lehner B., Doll P., Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, *J. Hydrology*, 2004, Vol. 296, Issue 1, No. 4, pp. 1–22, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.
70. Li C., Zhou L., Xu W., Estimating Aboveground Biomass Using Sentinel-2 MSI Data and Ensemble Algorithms for Grassland in the Shengjin Lake Wetland, China, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 1595, DOI: 10.3390/rs13081595.
71. Li X., Xiao J., A Global 0.05-Degree Product of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Derived from OCO-2, MODIS, and Reanalysis Data, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Article 517.
72. Liu T., Abd-Elrahman A., Dewitt B. et al., Evaluating the Potential of Multi-View Data Extraction from Small Unmanned Aerial Systems (UASs) for Object-Based Classification for Wetland Land Covers, *GIScience and Remote Sensing*, 2019, Vol. 56, pp. 130–159, DOI: 10.1080/15481603.2018.1495395.
73. Liu Y., Gong W., Xing Y. et al., Estimation of the forest stand mean height and aboveground biomass in Northeast China using SAR Sentinel-1B, multispectral Sentinel-2A, and DEM imagery, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, Vol. 151, pp. 277–289, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.016.
74. Long T., Zhang Z., He G. et al., 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 2019, No. 11, Article 489, DOI: 10.3390/rs11050489.
75. Loveland T. R., Belward A. S., The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover: First results, *Intern. J. Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, No. 15, pp. 3289–3295, DOI: 10.1080/014311697217099.
76. Loveland T. R., Merchant J. W., Ohlen D. O., Brown J. F., Development of a Land-Cover Characteristics Database for the Conterminous U.S., *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 1991, Vol. 57, pp. 1453–1463.
77. Lu L., Luo J., Xin Y. et al., How can UAV contribute in satellite-based *Phragmites australis* aboveground biomass estimating? *Intern. J. Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2022, Vol. 114, Article 103024, DOI: 10.1016/j.jag.2022.103024.
78. Lucas R. M., Mitchell A. L., Rosenqvist A. et al., The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: Case studies from the tropics, *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 2007, Vol. 17, pp. 245–264, DOI: 10.1002/aqc.833.
79. Lumbierres M., Méndez P. F., Bustamante J. et al., Modeling Biomass Production in Seasonal Wetlands Using MODIS NDVI Land Surface Phenology, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Article 392, DOI: 10.3390/rs9040392.
80. Magagi R., Bernier M., Ung C. H., Quantitative analysis of RADARSAT SAR data over a sparse forest canopy, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, pp. 1301–1313, DOI: 10.1109/TGRS.2002.800235.
81. Mahdavi S., Salehi B., Granger J. et al., Remote sensing for wetland classification: a comprehensive review, *GIScience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 55, No. 5, pp. 623–658, DOI: 10.1080/15481603.2017.1419602.
82. Mahdianpari M., Granger J. E., Mohammadimanesh F. et al., Meta-Analysis of Wetland Classification Using Remote Sensing: A Systematic Review of a 40-Year Trend in North America, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 11, Article 1882, DOI: 10.3390/rs12111882.
83. Mayaux P., Bartholome E., Massart M., van Cutsem C., Cabral A., Nonguierma A., Diallo O., Pretorius C., Thompson M., Cherlet M., *A Land Cover Map of Africa*, European Communities: Luxembourg, 2003.
84. Mirmazloumi S. M., Moghimi A., Ranjgar B. et al., Status and Trends of Wetland Studies in Canada Using Remote Sensing Technology with a Focus on Wetland Classification: A Bibliographic Analysis, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 20, Article 4025, DOI: 10.3390/rs13204025.
85. Mitsch W. J., Gosselink J. G., *Wetlands*, 4<sup>th</sup> ed., N. Y., USA: Wiley, 2007, 600 p.
86. Mizuochi H., Hiyama T., Ohta T., Nasahara K., Evaluation of the surface water distribution in North-Central Namibia based on MODIS and AMSR series, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 7660–7682, DOI: 10.3390/rs6087660.
87. Moreau S., Bosseno R., Gu X. F., Baret F., Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 85, pp. 516–529, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00053-1.
88. Morgan G. R., Wang C., Morris J. T., RGB Indices and Canopy Height Modelling for Mapping Tidal Marsh Biomass from a Small Unmanned Aerial System, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 3406, DOI: 10.3390/rs13173406.

89. Navarro A., Young M., Allan B. et al., The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate aboveground biomass of mangrove ecosystems, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 242, Article 111747, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111747.
90. Niu B., He Y., Zhang X. et al., Tower-Based Validation and Improvement of MODIS Gross Primary Production in an Alpine Swamp Meadow on the Tibetan Plateau, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Article 592, DOI: 10.3390/rs8070592.
91. O'Connell J. L., Byrd K. B., Kelly M., A Hybrid Model for Mapping Relative Differences in Belowground Biomass and Root: Shoot Ratios Using Spectral Reflectance, Foliar N and Plant Biophysical Data within Coastal Marsh, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 16480–16503, DOI: 10.3390/rs71215837.
92. Ordoyne C., Friedl M. A., Using MODIS data to characterize seasonal inundation patterns in the Florida Everglades, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 4107–4119, DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.027.
93. Ostroukhov A., Klimina E., Kuptsova V., Naito D., Estimating Long-Term Average Carbon Emissions from Fires in Non-Forest Ecosystems in the Temperate Belt, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 5, Article 1197, DOI: 10.3390/rs14051197.
94. Page S. E., Siegert F., Rieley J. O. et al., The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997, *Nature*, 2002, Vol. 420, pp. 61–65, DOI: 10.1038/nature01131.
95. Pashaei M., Kamangir H., Starek M. J., Tissot P., Review and Evaluation of Deep Learning Architectures for Efficient Land Cover Mapping with UAS Hyper-Spatial Imagery: A Case Study Over a Wetland, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 959, DOI: 10.3390/rs12060959.
96. Peregona A., Maksyutov S., Kosykh N. P., Mironycheva-Tokareva N. P., Map-based inventory of wetland biomass and Net Primary Production in Western Siberia, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, Vol. 113, pp. 168–182, DOI: 10.3390/rs12060959.
97. Pereira L. O., Furtado L. F. A., Novo E. M. L. M. et al., Multifrequency and Full-Polarimetric SAR Assessment for Estimating Above Ground Biomass and Leaf Area Index in the Amazon Várzea Wetlands, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Article 1355, DOI: 10.3390/rs10091355.
98. Plank S., Jüssi M., Martinis S., Twele A., Mapping of flooded vegetation by means of polarimetric Sentinel-1 and ALOS-2/PALSAR-2 imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 38, pp. 3831–3850, DOI: 10.1080/01431161.2017.1306143.
99. Poulin B., Davranche A., Lefebvre G., Ecological assessment of Phragmites australis wetlands using multi-season SPOT-5 scenes, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, pp. 1602–1609, DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.014.
100. Poulter B., Christensen N. L., Halpin P. N., Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, Vol. 111, pp. 907–923.
101. Qiu R., Han G., Ma X. et al., A Comparison of OCO-2 SIF, MODIS GPP, and GOSIF Data from Gross Primary Production (GPP) Estimation and Seasonal Cycles in North America, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 258, DOI: 10.3390/rs12020258.
102. Rapinel S., Hubert-Moy L., Clement B., Combined use of LiDAR data and multispectral earth observation imagery for wetland habitat mapping, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, Vol. 37, pp. 56–64, DOI: 10.1016/j.jag.2014.09.002.
103. Rappold A. G., Stone S. L., Cascio W. E. et al., Peat bog wildfire smoke exposure in rural north Carolina is associated with cardiopulmonary emergency department visits assessed through syndromic surveillance, *Environmental Health Perspectives*, 2011, Vol. 119, pp. 1415–1420, DOI: 10.1289/ehp.1003206.
104. Rocha A. V., Goulden M. L., Why Is Marsh Productivity so High? New Insights from Eddy Covariance and Biomass Measurements in a Typha Marsh, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, Vol. 149, pp. 159–168, DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.07.010.
105. Santoro M., Beer C., Cartus O., Schmillius C., Shvidenko A., McCallum I., Wegmueller U., Wiesmann A., The BIOMASAR algorithm: An approach for retrieval of forest growing stock volume using stacks of multi-temporal SAR data, *Proc. ESA Living Planet Symp.*, 28 June – 2 July 2010, 2010, Vol. 28.
106. Shang W., Gao Z., Jiang X., Chen M., The Extraction of Wetland Vegetation Information Based on UAV Remote Sensing Images, *Proc. Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XV*, Gao W., Chang N.-B., Wang J. (eds.), San Diego, CA, USA: SPIE, 2018, 38 p.
107. Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M., A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, Vol. 18, Article GB3004, DOI: 10.1029/2003GB002190.
108. Shvidenko A., Schepaschenko D., Vaganov E. et al., Impacts of vegetation fire in Russian territories on ecosystems and global carbon budget in 1998–2010, *Doklady Earth Science*, 2011, Vol. 441, pp. 1678–1682, DOI: 10.1134/S1028334X11120075.
109. Sirin A., Medvedeva M., Remote Sensing Mapping of Peat-Fire-Burnt Areas: Identification among Other Wildfires, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 194, DOI: 10.3390/rs14010194.

110. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S., Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin, *Water Resources*, 2020, Vol. 47, No. 6, pp. 719–728, DOI: 10.1134/S0097807820060135.
111. Stone T. A., Schlesinger P., Houghton R. A., Woodwell G. M., A Map of the Vegetation of South America Based on Satellite Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1994, Vol. 60, pp. 541–551.
112. Tan Q., Shao Y., Yang S., Wei Q., Wetland vegetation biomass estimation using Landsat-7 ETM+data, *Proc. 2003 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'03)*, Toulouse, France, 21–25 July 2003, 2003, pp. 2629–2631.
113. Tao J., Mishra D. R., Cotten D. L. et al., A Comparison between the MODIS Product (MOD17A2) and a Tide-Robust Empirical GPP Model Evaluated in a Georgia Wetland, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Article 1831, DOI: 10.3390/rs10111831.
114. Terent'eva I. E., Sabrekov A. F., Glagolev M. V. et al., A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide, *Water Resources*, 2017, Vol. 44, No. 2, pp. 297–307, DOI: 10.1134/S0097807817020154.
115. Toriyama J., Takahashi T., Nishimura S. et al., Estimation of fuel mass and its loss during a forest fire in peat swamp forests of central Kalimantan, Indonesia, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 314, pp. 1–8, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.11.034.
116. Townsend P. A., Estimating forest structure in wetlands using multitemporal SAR, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 79, pp. 288–304, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00280-2.
117. Tuanmu M. N., Jetz W., A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modeling, *Global Ecology and Biogeography*, 2014, Vol. 23, No. 9, pp. 1031–1045, DOI: 10.1111/geb.12182/abstract.
118. Wang D., Wan B., Liu J. et al., Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in China using an upscaling method from field plots, UAV-LiDAR data and Sentinel-2 imagery, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, Vol. 85, Article 101986, DOI: 10.1016/j.jag.2019.101986.
119. White L., Brisco B., Daboor M. et al., A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 6, pp. 7615–7645, DOI: 10.3390/rs70607615.
120. White M. A., Thornton P. E., Running S. W., Nemani R. R., Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls, *Earth Interactions*, 2000, Vol. 4, No. 3, pp. 1–85, DOI: 10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2.
121. Wohlfart C., Winkler K., Wendleder A., Roth A., TerraSAR-X and Wetlands: A Review, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Article 916, DOI: 10.3390/rs10060916.
122. Xu T., Weng B., Yan D. et al., Wetlands of International Importance: Status, Threats, and Future Protection, *Intern. J. Environmental Research and Public Health*, 2019, Vol. 16, Article 1818, DOI: 10.3390/ijerph16101818.
123. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al., *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*, 2021, DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
124. Zhang W., Gao F., Jiang N. et al., High-Temporal-Resolution Forest Growth Monitoring Based on Segmented 3D Canopy Surface from UAV Aerial Photogrammetry, *Drones*, 2022, Vol. 6, No. 7, Article 158, DOI: 10.3390/drones6070158.
125. Zhang W., Liu L., Zhao T. et al., GWL\_FCS30: a global 30 m wetland map with a fine classification system using multi-sourced and time-series remote sensing imagery in 2020, *Earth System Science Data*, 2023, Vol. 15, Issue 1, pp. 265–293, DOI: 10.5194/essd-15-265-2023.
126. Zhao Y., Mao D., Zhang D. et al., Mapping *Phragmites australis* Aboveground Biomass in the Momoge Wetland Ramsar Site Based on Sentinel-1/2 Images, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 694, DOI: 10.3390/rs14030694.
127. Zharko V. O., Bartalev S. A., Sidorenkov V. M., Forest growing stock volume estimation using optical remote sensing over snow-covered ground: a case study for Sentinel-2 data and the Russian Southern Taiga region, *Remote Sensing Letters*, 2020, Vol. 11, Issue 7, pp. 677–686, DOI: 10.1080/2150704X.2020.1755473.