

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КРОСС-СЕНСОРНОЕ СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ПРОДУКТОВ SENTINEL-2 И GAOFEN-1B/C ДЛЯ СЕВЕРНЫХ ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ

© 2022 г. Е. В. Черепанова^а*, Н. В. Феоктистова^а

^а Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: lel.cherepanova@gmail.com

Поступила в редакцию 14.09.2022 г.

В настоящем исследовании представлены результаты валидации информационных продуктов по отражающей способности поверхности и NDVI с учетом типов почвенно-растительного покрова, получаемых по спутниковым данным китайского датчика PMS GF-1 и эталонным данным европейского датчика MSI Sentinel-2 (EKA) с использованием метода взаимного сопоставления данных. На основе проведенного анализа выявлена высокая корреляция сопоставляемых информационных продуктов GF-1 и эталонных информационных продуктов Sentinel-2. Полученные регрессионные коэффициенты с высокой степенью надежности могут быть использованы при проведении комплексного анализа спутниковых данных для пересчета значений, полученных датчиком PMS, в соответствующие значениям датчика MSI, в том числе с учетом камеры конкретного спутника (GF-1C или GF-1B).

Ключевые слова: валидация данных ДЗЗ, Gaofen-1B/C, отражающая способность поверхности, NDVI, почвенно-растительный покров

DOI: 10.31857/S0205961422060045

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в высоких широтах Восточной Сибири наблюдается форсирование многих природных процессов с последующей трансформацией естественной среды, в том числе аномальный рост летних температур и глубины протаивания сезонного слоя (Анисимов О.А. и др., 2020, Пономарев Е., 2019, Li X.Y. et al., 2021), дестабилизация вечной мерзлоты и высвобождения залежей метана (Pugach S.P. et al., 2018; Семилетов И.П. и др., 2019, Богоявленский В.И. и др., 2020), увеличение площадей и интенсивности лесных пожаров (Бондур, 2020; Бондур и др. 2019; Бондур, Гордо, 2018).

Спутниковый мониторинг высокоширотных лесов имеет серьезное преимущество перед наземными методами, учитывая обширность приарктических территорий, их малонаселенность и труднодоступность (Бондур, Воробьев, 2015; Бондур, 2016). В тоже время для арктико-бореальных регионов существует проблема фрагментарности данных, обусловленная коротким вегетационным сезоном и часто неблагоприятными условиями для съемки, которая может быть решена путем совместного использования данных ДЗЗ, получаемых различными спутниками.

Оценка точности данных, получаемых с ресурсных спутников различных стран, является ключевой задачей, решение которой позволит су-

щественно снизить ограничения в использовании продуктов ДЗЗ. Эффективность использования данных ДЗЗ напрямую зависит от проведенных мероприятий по валидации данных и оценки неопределенностей. Процесс валидации представляет собой проверку согласованности данных ДЗЗ с эталонными измерениями, которые, как предполагается, представляют истинность, по крайней мере, в пределах их собственных неопределенностей.

Следует отметить общую проблему отсутствия стандартизированных производных информационных продуктов данных ДЗЗ (например, вегетационные индексы, альbedo и др.), получаемых по данным спутниковых группировок стран БРИКС, в отличие от американских и европейских спутниковых группировок. Например, на сегодняшний день насчитывается более 30 производных стандартизированных продуктов ДЗЗ, получаемых прибором MODIS, установленном на спутниках серии Aqua/Terra. Недостаточность сети валидационных полигонов, отсутствие унифицированных методик и публикаций по итогам уже проведенных работ по валидации информационных продуктов характерны для бразильских и российский спутниковых систем и в меньшей степени для китайских.

В настоящее время с китайских спутников серии Gaofen-1 (GF-1) доступны данные 1 уровня

обработки. Для использования в прикладных исследованиях эти данные необходимо обработать до 2 и 3 уровня, то есть провести калибровку, атмосферную коррекцию для максимально возможного устранения влияния атмосферы и пиксельный контроль качества для исключения пикселей с некорректными значениями. Технически эти операции регламентированы, однако, качество полученных информационных продуктов должно быть проконтролировано с использованием наземных и модельных данных, либо с привлечением аналогичных спутниковых продуктов, прошедших валидацию в соответствии с принятыми требованиями к качеству спутниковых продуктов 2 и 3 уровня (ESA GMQ Session; Report from Land Cal/Val WS 2020, Loew A. et al., 2017).

Метод кросс-валидации или взаимного сопоставления продуктов, получаемых датчиками с близкими характеристиками, основан на предположении, что приземные и атмосферные условия для целевого и эталонного приборов одинаковы, так как разница во времени съемки минимальна, разница в зенитном угле солнца не превышает 2 градусов, а сигналы верхних слоев атмосферы (TOA) двух датчиков идентичны, когда корректируется разница спектральных характеристик (Feng L. et al., 2016).

Разница в спектральных характеристиках, пространственном разрешении, угле обзора сенсоров, а также атмосферных условий и освещении приводит к различиям в оценке отражающей способности поверхности и, следовательно, вызывает вариации производного индекса NDVI. Различия в спектральном диапазоне датчиков могут привести к неопределенности в оценке отражательной способности поверхности до 2.5% (Chander, 2013). В исследовании (Teillet, Ph., Ren X., 2008) было установлено, что различия в значениях отражательной способности могут привести к 10% разнице значений NDVI, полученных различными датчиками.

Существует несколько подходов к кросс-калибровке спутниковых данных. Как правило, они основаны на одновременных или почти одновременных наблюдениях одной территории несколькими датчиками, один из которых выступает в качестве эталона. Такой метод неоднократно был использован для данных китайских спутников, таких как GF-1, GF-4, ZY-3 (WU Xiaoping, 2020; Wang, 2020; Xu, 2016) Также кросс-калибровка разных датчиков может проводиться с использованием больших временных рядов данных с разным пространственным разрешением (D'Odorico 2013; Albarakat, R, 2019).

Во многих работах в качестве опорных данных используют данные спутников серии Landsat или Sentinel, так как это хорошо известные, доступные и валидированные информационные про-

дукты (Xiaoping WU, 2020, Wang Q., 2020, Gao H, 2016, Sterckx S., 2019). Схожие характеристики сенсоров PMS (GF-1) и MSI (Sentinel-2), такие как пространственное разрешение и близкие спектральные диапазоны, делают их перспективными для совместного использования в исследованиях. Комбинация этих данных позволит получить информационный продукт с высоким пространственно-временным разрешением и даст возможность оценивать текущее состояние и динамику изменений растительности на более детальном пространственном уровне. Таким образом, возникает необходимость проведения кросс-калибровки сенсоров этих спутников.

В данной работе проводилась кросс-калибровка значений отражательной способности (SR) и индекса NDVI, рассчитанными по данным датчиков MSI (Sentinel-2) и PMS (GF-1B/C), полученным квазисинхронно на тестовых участках северо-восточных лесов Восточной Сибири.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Регион исследования. В качестве тестового региона для проведения данного исследования рассматривалась территория Жиганского района в северо-западной части Якутии (см. рис. 1). Территория расположена в зоне сплошной криолитозоны преимущественно в Центрально-Якутской низменности с высотами менее 200 м, на востоке высоты могут достигать 800 м в отрогах Верхоянского хребта. С юга на север район пересекает река Лена, а ее многочисленные притоки образуют обширные озерно-болотные ландшафты.

В районе преобладают малопродуктивные преимущественно редкостойные лиственничные леса (90%) (Протопопова В.В., 2018). Климат региона резко континентальный, с суровой продолжительной зимой (средняя температура января -38°C) и коротким летом (средняя температура июля $+15^{\circ}\text{C}$). Годовое количество осадков около 250–400 мм.

Спутниковые данные. Для проведения валидации данных, содержащих информацию о почвенно-растительном покрове, были выбраны продукты отражательной способности поверхности и NDVI на основе данных высокого разрешения, поступающих с китайских спутников GF-1B/C/D. Спутники оснащены панхроматической и мультиспектральной камерой (PMS) с разрешением 2 и 8 м. Для сравнения и кросс-валидации изображений со спутников GF-1B/C/D (целевые данные) рассматривались валидированные данные со спутников Landsat 8 и Sentinel-2 (эталонные данные). Анализ покрытия территории исследования и характеристик аппаратуры показал, что

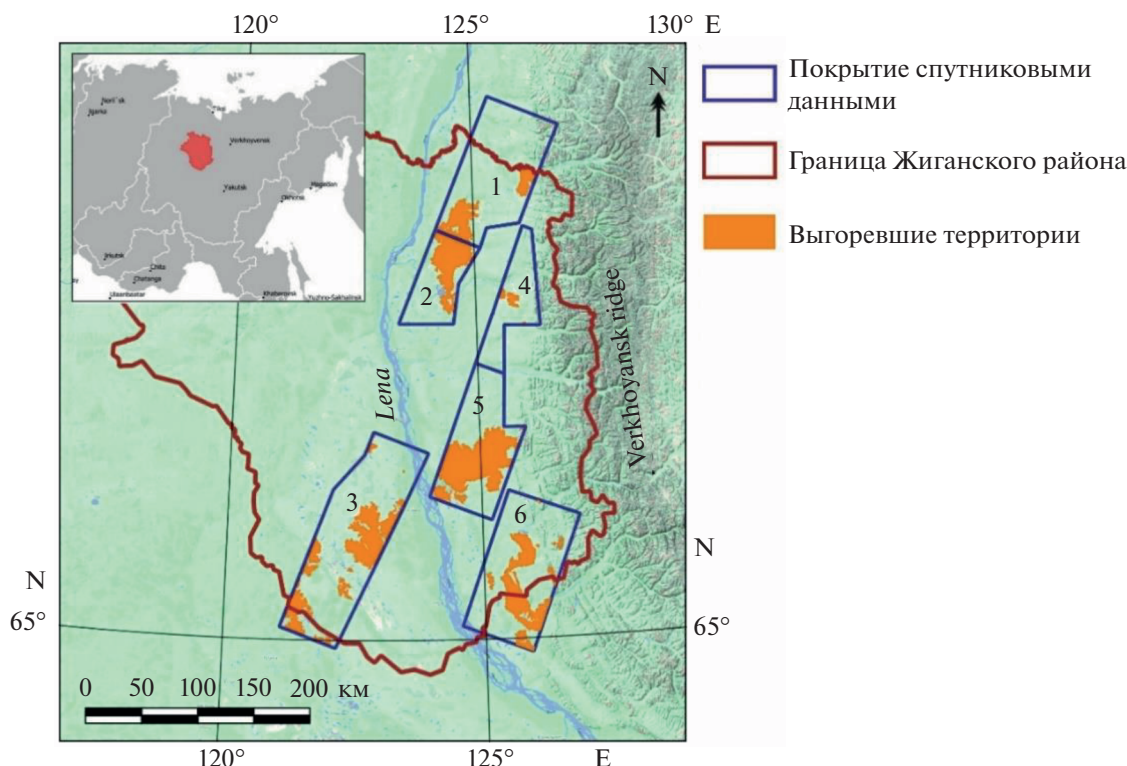


Рис. 1. Схема покрытия тестовой территории синхронными данными со спутников GF-1B/C и Sentinel-2A/B.

целесообразно использовать данные со спутников Sentinel-2, т.к. они близки по пространственному разрешению и спектральным диапазонам (табл. 1), а также, аппаратура MSS спутников Sentinel-2 имеет большую полосу съемки, что увеличивает вероятность подбора синхронных данных для кросс-калибровки.

Датчик MSI спутников Sentinel-2 имеет 13 спектральных полос. В настоящем исследовании рассматривалось 4 диапазона с пространственным разрешением 10 м в видимом и ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне. Спутники Sentinel-2 имеют 2 диапазона ближнего инфракрасного (NIR) диапазона (8 и 8a). Для исследования мы использовали канал 8, поскольку его спектральный диапазон ближе к инфракрасному каналу датчика PMS на борту спутников GF-1B/C и используется

для расчета NDVI. Радиометрическое разрешение спутников Sentinel-2 и GF-1B/C составляет 12 бит и 10 бит соответственно. Частота повторных посещений каждого отдельного спутника Sentinel-2 составляет 10 дней, а повторных посещений объединенной группировки – 5 дней. Оба типа спутников работают на солнечно-синхронной орбите со временем пересечения экватора около 10:30 утра.

Для сравнения и кросс-валидации информационных продуктов были выбраны синхронные с изображениями Sentinel-2 изображения GF-1B/C (13 сцен) для тестового региона, полученные 27 августа 2019 г., 28 июля 2021 г. и 29 июля 2021 г. Для удобства обработки и анализа 13 сцен были скомбинированы по дате съемки в 6 участков общей площадью 40629 км², как показано на рис. 1.

Таблица 1. Параметры съемочной аппаратуры спутников GF-1B/C и Sentinel-2

GF-1B/C, PMS			Sentinel-2, MSI		
канал №	спектральный диапазон (мкм)	разрешение (м)/ охват (км)	канал №	спектральный диапазон (мкм)	разрешение (м)/ охват (км)
1	0.450–0.520	8/66	2	0.439–0.535	10/290
2	0.520–0.590		3	0.537–0.582	
3	0.63–0.69		4	0.646–0.685	
4	0.77–0.89		8	0.767–0.908	

Таблица 2. Условия съемки пар изображений GF-1B, GF-1C и Sentinel-2A/B

№ участка	Спутник, сенсор	Дата	Время (UTC)	Азимутальный угол солнца	Зенитный угол солнца
1, 2, 3	GF-1B, PMS	28.07.21	3:45	176–180	46–49
4, 5	Sentinel-2A, MSI	29.07.21	3:49	177–179	46–50
	GF-1C, PMS		3:38	177–179	47–49
6	Sentinel-2A, MSI	27.08.19	3:19	170–173	47–49
	GF-1B, PMS		3:32	178	55
	Sentinel-2B, MSI		3:29	178	55

Поскольку попарные данные для этого исследования были собраны в один и тот же день в близкое время (см. табл. 2), будем считать, что условия наблюдения, такие как освещение и атмосферные условия идентичны. Как видно из табл. 2, зенитный и азимутальный углы солнца очень близки (за исключением изображений, полученных 29 июля 2021 г.).

Данные со спутников GF-1B/C были получены с помощью российского узла международной платформы обмена спутниковыми данными и результатами их валидации между странами БРИКС, реализованной на основе облачной среды и развернутого в НИИ “АЭРОКОСМОС”. Предоставленные китайские данные соответствуют 1 уровню и требуют дополнительной обработки для получения информационных продуктов.

В отличие от данных GF-1B/C, данные Sentinel-2 предоставляются пользователям в виде готового информационного продукта, прошедшего калибровку и валидацию, и готовы к дальнейшему анализу (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR). Продукт Sentinel-2 Level-2A – это ортотрансформированный, атмосферно-скорректированный коэффициент отражательной способности поверхности, рассчитанный процессором Sen2Cor (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/>). Данные Sentinel-2 были получены с помощью облачной платформы для геопространственного анализа данных Google Earth Engine, дополнительно была проведена операция маскирования облачности (менее 5% от площади снимка), а также все данные были спроецированы в проекцию UTM (зона 51N).

Предварительная обработка спутниковых данных серии GF-1B/C и подготовка информационных продуктов. Предварительная обработка изображений, полученных со спутников GF-1B/C для получения продукта со значениями отражающей способности поверхности включала радиометрическую коррекцию, ортотрансформирование, перепроецирование в проекцию UTM (зона 51N), атмосферную коррекцию и пространственную совместную привязку с данными Sentinel-2 с субпиксельной точностью.

Атмосферная коррекция проводилась с использованием модели быстрого атмосферного анализа спектральных гиперкубов (FLAASH). Все операции выполнялись в ПО ENVI 5.2. Коэффициенты для радиометрической калибровки и файлы функций спектрального отклика можно загрузить с веб-сайта Китайского центра ресурсов спутниковых данных и приложений (<http://www.cresda.com/CN/Downloads>).

После атмосферной коррекции несколько пикселей со значениями ниже нуля и выше 1 были исключены для каждого диапазона GF-1B/C. Эти пиксели соответствуют сильно отражающим поверхностям, таким как песок, а отрицательные значения, соответствуют глубокой воде или глубоким теням с низким уровнем яркости.

При проведении тщательной перекрестной калибровки необходимо учитывать корректировки, соответствующие эффектам двулучевой функции отражательной способности (BRDF) из-за различий в освещении и углах наблюдения (Liu Q., 2019). Однако, при использовании пар синхронных изображений, когда разница во времени съемки и условия освещения минимальны и состояние атмосферы можно считать одинаковыми, а сравниваемые датчики имеют одинаковые углы обзора, корректировками BRDF можно пренебречь (Teillet, 2001), поэтому в данном исследовании корректировки BRDF не проводились.

Следующим шагом было вычисление индекса NDVI. Одним из наиболее востребованных информационных продуктов дистанционного зондирования Земли для решения задач оценки растительного покрова является индекс NDVI. Расчет NDVI основан на разнице отражательной способности растений в красной и инфракрасной областях спектра. В красной зоне спектра (0.62–0.75 мкм) наблюдается максимальное поглощение солнечной радиации хлорофиллом, а в ближней инфракрасной зоне (0.75–1.3 мкм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листьев. NDVI рассчитывается как (Weir, 2000):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном диапазоне с максимальным отражением энергии

клеточной структурой листьев, RED – отражение в красной зоне, характеризующееся максимальным поглощением солнечной радиации хлорофиллом. Значения NDVI варьируются от +1.0 до –1.0. Для расчета NDVI для Sentinel-2 использовались данные 4 (Red) и 8 (NIR) каналов. Для спутников GF-1B/1C использовались каналы 3 (Red) и 4 (NIR). Для дальнейшего анализа для обоих изображений в каждой паре были исключены фрагменты с облаками, тенями, дымом от лесных пожаров и высокогорные участки.

Подготовка карты типов земного покрова (Copernicus, VIIRS/ Suomi NPP, Proba V). Особенностью исследуемой территории является труднодоступность для проведения полевых исследований и в тоже время однородность типов растительного покрова, когда значительные площади монопродуктивных лиственных лесов и редколесий, сменяются обширными районами кустарниково-травянистой растительности и озерами. С другой стороны, наличие вечной мерзлоты и разветвленной плотной гидрографической сети формируют мозаичность ландшафтов и экотонов в зависимости от степени увлажнения, которые слабо отражаются на типах доминирующего растительного покрова в принятой классификации типов земного покрова, однако, влияют на отражающую способность поверхности и как следствие, на качество классификаций спутниковых данных по типам земного покрова, особенно на данных высокого разрешения.

На данном этапе мы использовали карту типов земного покрова, полученную по спутниковым данным с невысоким пространственным разрешением (100 м) при отсутствии в открытом доступе более точных данных, для оценки влияния различных типов поверхности на вариации значений информационных продуктов с высоким пространственным разрешением (8 м), полученных датчиками PMS и MSI.

Данные о земном покрове территории были получены из двух спутниковых продуктов: Copernicus Land Cover 2019 (PROBA-V) 100 м (Buchhorn, M., 2020) и ActiveFire VIIRS (Suomi NPP, NOAA-20) 375 м (Schroeder, W., 2014). На рис. 2 представлена карта типов поверхности на исследуемую территорию по спутниковым данным.

Продукт Copernicus Global Land Service GLC (CGLS-LC100) обновлялся с 2015 по 2019 год с общей точностью на глобальном масштабе порядка 75.1% +/-0.7% (Tsendbazar N., 2020). Однако результаты классификации в высоких широтах могут быть менее точными из-за низкой плотности обучающих данных и высокой облачности в течение года. Всего на территории было выявлено 13 различных типов земного покрова, которые затем были объединены в 4 доминирующих класса (30, 80, 113, 300) (см. рис. 2). Различные варианты

подтипов растительного покрова преимущественно объединялись, так как слишком сильная детализация, особенно мозаичного травянистого и кустарникового заболоченного растительного покрова, приводит к значительным ошибкам достоверности определения класса типа земного покрова на локальном масштабе в высоких широтах. Классы с малым числом пикселей были объединены в класс *Другие*.

Поскольку выгоревшие территории еще не учитываются алгоритмом CGLS-LC100, а в последние 5 лет лесные пожары на территории тестовых участков занимают значительные площади, возникла необходимость выделения отдельных классов ежегодных гарей. Для восстановления границ гарей был использован спутниковый продукт ActiveFire Suomi NPP VIIRS 350m, на основе ежедневно регистрируемых тепловых аномалий были построены полигоны площадей, пройденных огнем в пожароопасный летний период. Затем, с использованием визуального контроля по видимым каналам GF-1B/1C (прибор PMS) границы выгоревших территорий были скорректированы и рассчитаны площади. За рассматриваемый период с 2017 года на тестовых территориях выгорело: 2017 г. – 15 км², 2018 г. – 2252 км², 2019 г. – 3346 км², 2020 г. – 1170 км², 2021 г. – 2002 км². Ежегодные гари были выделены в отдельные классы (217–221) и включены в окончательную карту типов земного покрова на исследуемой территории (см. рис. 2).

Необходимо отметить, что лиственные леса и редколесья (*класс 113*) занимают значительные площади на каждом участке. Также на каждом участке присутствует комбинированный класс (*класс 30*), в котором представлена кустарниковая и травяная растительность и заболоченные территории. Больше всего водных объектов (*класс 80*) по площади расположено на 3 участке. Порядка 40% площадей 3 и 5 участков выгорело в результате лесных пожаров 2018 и 2019 гг., остальные участки также пострадали от пожаров. Чаше всего – 4 раза за рассматриваемый период горела территория 3 участка, меньше всего площадей выгорело на 4 участке.

Карта типов земного покрова была подготовлена для проведения уточненного анализа продуктов отражательной способности и индекса NDVI по данным спутников GF-1B/1C (прибор PMS) по сравнению с данным Sentinel-2A (прибор MSI).

Методика взаимного сопоставления информационных продуктов GF-1B/1C (прибор PMS) и Sentinel-2A/B (прибор MSI). Валидация информационных продуктов, полученных по данным китайской спутниковой группировки GF-1, проводилась с использованием метода взаимного сопоставления с уже валидированными продуктами, полу-

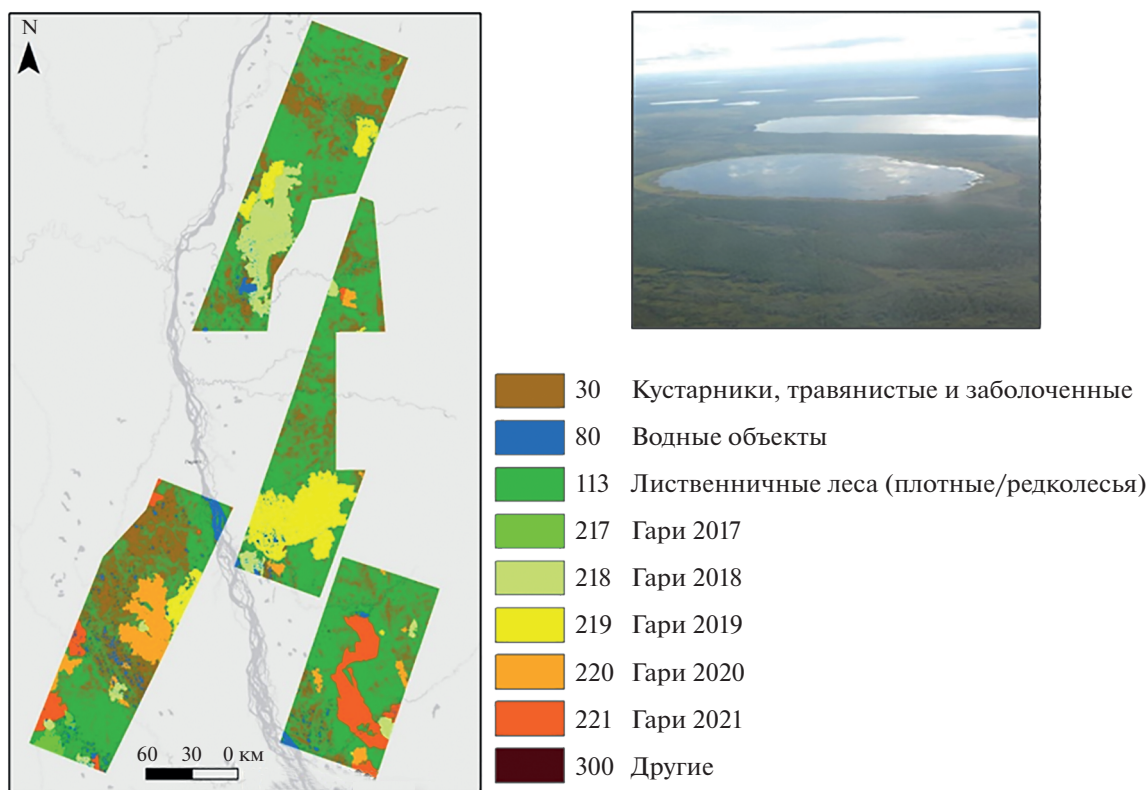


Рис. 2. Карта доминирующих типов поверхности на исследуемой территории по спутниковым данным Copernicus Land Cover 2019 (PROBA-V) 100 м и ActiveFire VIIRS (Suomi NPP, NOAA-20) 375 м.

ченными спутниками серии Sentinel-2 (Европейское Космическое Агентство).

Для сравнительного анализа данных был применен подход попарного сопоставления значений каждого пиксела всего поля изображений или набора контрольных точек с совпадающими координатами (n – число измерений). Всего для каждого участка было выбрано 100 000 контрольных точек, распределенных случайным образом в зависимости от площадей, занятых различными классами типов земной поверхности.

Количественная оценка связи сопоставляемых данных была дана на основе расчета параметров регрессионных моделей. Статистические функции для преобразования между значениями продуктов Sentinel-2A/B MSI и PMS (GF-1C и GF-1B) (отражательная способность поверхности, индекс NDVI) были получены с использованием линейной регрессии. Качество подгонки регрессионной модели определялось коэффициентом детерминации (R^2), а ее значимость определялась значением p -value < 0.001 , при котором выбранная модель хорошо соответствует данным.

Так как индекс NDVI, как правило, используется для анализа состояния растительного покрова, для валидации значений NDVI использовались только контрольные точки, относящиеся к классам

травянисто-кустарниковой растительности, лиственных лесов и выгоревших лесов с 2017 г. По результатам расчетов строились точечные диаграммы рассеяния, характеризующие связь значений индекса NDVI (> 0), полученных по данным Sentinel-2 и GF-1 для каждого участка. Для каждого участка также были рассчитаны количественные соотношения перехода между значениями, получаемыми по данным GF-1 и Sentinel 2. Указано количество анализируемых значений (N), коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратичная ошибка (RMSE). Плотность расположения точек на графиках показана цветом: чем плотнее расположены точки, тем более красный цвет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Предварительно было проведено сравнение атмосферно скорректированных данных спутников GF-1B/C (прибор PMS) и Sentinel-2 (прибор MSI) путем вычисления средних значений отражающей способности по всем участкам для каждого канала. Как было показано в таблице 1, для сравнения были отобраны 2, 3, 4 и 8 каналы MSI, близкие по спектральному диапазону 1, 2, 3 и 4 каналам сенсора PMS соответственно. На рисун-

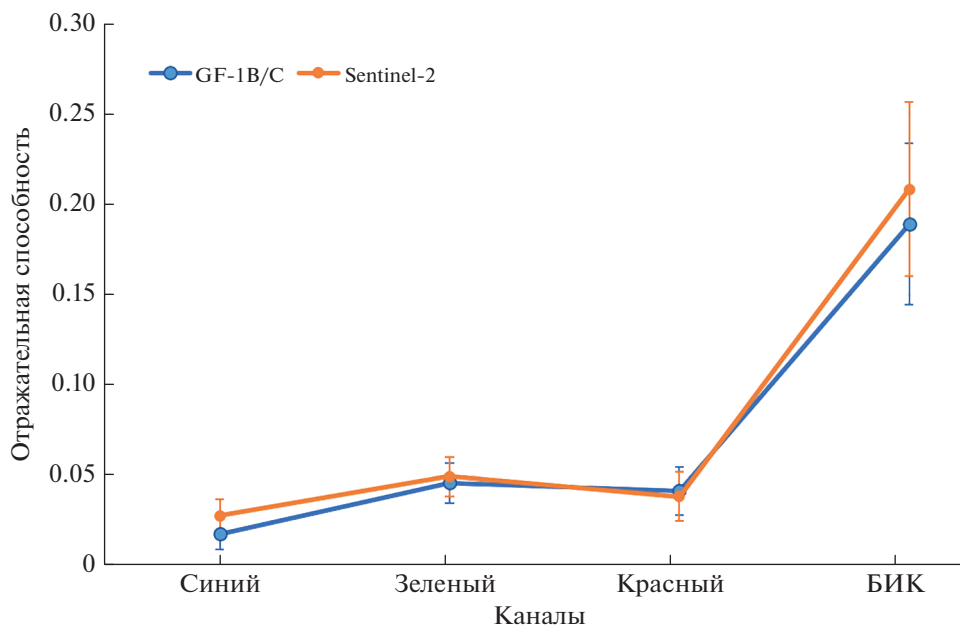


Рис. 3. График средних значений отражающей способности GF-1B/C (прибор PMS) и Sentinel-2 (прибор MSI) по всем тестовым участкам.

ке 3 показаны кривые средних значений отражающей способности, которые показывают достаточно хорошую согласованность между датчиками PMS и MSI.

При этом отражательная способность у MSI в среднем выше PMS, кроме красного канала (рис. 3). Наименьшая разница в коэффициенте отражения была обнаружена в зеленых и красных каналах, а наибольшая – в ближнем инфракрасном канале.

Также было проведено сравнение функций спектрального отклика для исследуемых приборов. На рис. 4 представлены спектральные профили для 4 анализируемых каналов датчика PMS (GF-1C и GF-1B) и датчика MSI (Sentinel-2).

Как видно из рис. 4, для датчика PMS спутника GF-1C характерно снижение спектрального отклика для более коротких длин волн в видимых каналах спектра. В красном и зеленом каналах ширина диапазона у датчика MSI уже, чем у PMS. Разница между профилями спектрального отклика GF-1C и GF-1B значительна, поэтому необходимо проводить валидацию продуктов отражательной способности поверхности и индекса NDVI для этих спутников отдельно.

Для изучения взаимосвязи значений информационных продуктов, получаемых с датчиков MSI и PMS, был проведен регрессионный анализ и получены коэффициенты регрессии для каждой пары изображений. В табл. 3 представлены результаты взаимного попиксельного сопоставления значений отражающей способности в зеленом, синем, красном и ближнем инфракрасном

каналах и индекса NDVI, полученных по данным приборов PMS и MSI.

Как видно из табл.3, средние значения целевых информационных продуктов PMS (GF-1C и GF-1B) в большинстве случаев меньше средних синхронных значений эталонных информационных продуктов прибора MSI (Sentinel-2A/B). Максимальные невязки средних значений характерны для значений отражающей способности в красном и инфракрасном каналах и продукте NDVI для сопоставляемой пары Sentinel-2A и GF-1C на 4 и 5 участках. Наибольшая корреляция ($R^2 > 0.9$ для всех продуктов) обнаружена между данными датчика PMS и MSI для сопоставляемой пары Sentinel-2A и GF-1B. Слабее выражена линейная зависимость между целевыми и эталонными информационными продуктами, полученными с Sentinel-2B и GF-1B на 6 участок.

Далее были исследованы зависимости между значениями для информационных продуктов для различных типов земной поверхности с целью получения более точных количественных характеристик для сопоставления данных Sentinel и GF. Для этого были рассчитаны коэффициенты линейной регрессии (a , b), коэффициент детерминации (R^2), а также определено количество значений в выбранном классе для каждого участка (n), по которым строилась регрессионная модель. Ниже в табл. 4–7 представлены результаты расчетов параметров линейной регрессии ($S2 = a + b \cdot GF1$) поканального сопоставления значений отражательной способности для пар Sentinel/GF1 для

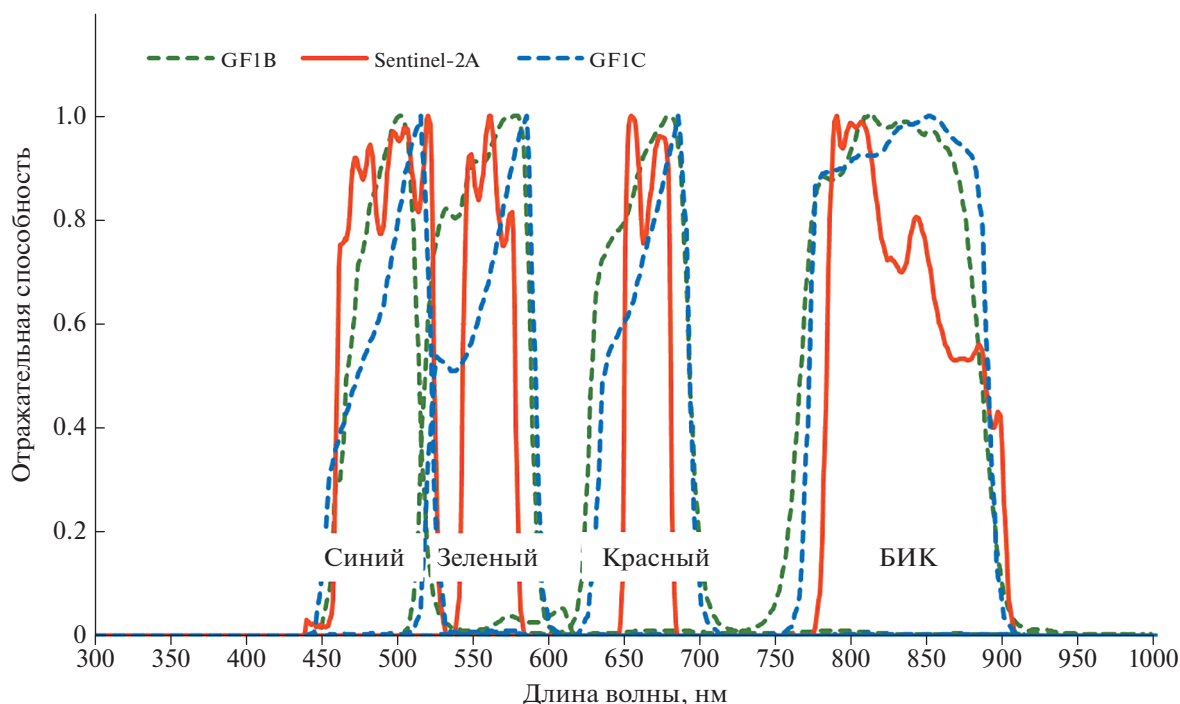


Рис. 4. Профили функций спектрального отклика датчика PMS (GF-1C и GF-1B) и датчика MSI (Sentinel-2).

различных типов земного покрова в пределах каждого участка.

В табл. 4 представлен пример результатов расчета параметров линейной регрессии поканального сопоставления значений отражательной способности для пар Sentinel/GF для определенного типа почвенно-растительного покрова.

Результаты сопоставления значений отражательной способности для территорий с плотными и редколесными лиственными лесами показывают высокую корреляцию ($R^2 > 0.9$) значений для 1–3 участков (Sentinel-2A и GF-1B) для всех анализируемых каналов, за исключением NIR канала на 1 участке ($R^2 = 0.71$). На 4 и 5 участках (Sentinel-2A и GF-1C) регистрируется заметная корреляция ($R^2 > 0.7$) между значениями отражательной способности лесных территорий для всех каналов. Для 6 участка (Sentinel-2B и GF-1B) характерна умеренная корреляция значений в этом классе с коэффициентом $R^2 < 0.3$.

Результаты значений сопоставления отражательной способности для территорий, с комбинированным кустарниково/травянисто/заболоченным покрытием, показывают высокую корреляцию ($R^2 > 0.9$) значений для 3 и 2 участка (Sentinel-2A и GF-1B) для всех анализируемых каналов. Для 1 участка, относящегося к этой же паре спутников, значения R^2 не превышает 0.6, что характеризует более низкое качество подобранной модели. Одной из вероятных причин может быть несоответствующая масштабу исследования генерализация ландшафтов кустарниковых и травянистых по-

верхностей с различными режимами увлажнения в один класс. Как видно на рис. 2 данный класс занимает значительные площади в северной части 1 участка. Для 6 участка (Sentinel-2B и GF-1B) обнаружена слабая корреляция в этом классе с коэффициентом $R^2 < 0.3$.

Гари показывают высокую корреляцию ($R^2 > 0.8$) значений отражательной способности (SR) для 1, 2, 3 и 5 участков (Sentinel-2A и GF-1B) для всех анализируемых каналов. На 4 участке выгоревшие территории занимают небольшие площади по сравнению с другими участками и как следствие, для анализа использовалось наименьшее число контрольных точек класса среди других участков ($n = 1606$), что вероятно определяет более низкое качество модели ($R^2 0.7–0.8$), а не более слабую корреляцию. Для 6 участка (Sentinel-2B и GF-1B) корреляция изменяется от умеренной в видимых каналах до заметной в инфракрасном.

Для продуктов с индексом NDVI в целом характерна высокая корреляция значений между данными GF-1 и Sentinel-2, диапазон значений R^2 от 0.71 до 0.97 (см. рис. 5, а–5, е). Наилучшая корреляция ($R^2 = 0.97$) значений NDVI, получаемых GF-1 и Sentinel-2, показана на 3 участке (см. рис. 5, б), который характеризуется равномерным чередованием различных типов растительного покрова, когда значительные площади более-менее однородны по видовому составу и типу увлажнения. Это отражает равномерное распределение точек вдоль прямой регрессии, когда более высокие значения NDVI характерны для плотных лист-

Таблица 3. Результаты взаимного попиксельного сопоставления спутниковых изображений, полученных датчиками PMS и MSI

Канал	Коэффициенты регрессии $S2 = a + bGF1$		Коэффициенты регрессии $GF1 = a + bS2$		R^2	n	Сред. знач. GF1	Разница ср. знач. GF1-S2
	a	b	a	b				
Sentinel-2A и GF-1B (28.07.2021, участки 1,2,3)								
Blue	0.007723	0.993227	-0.005976	0.944432	0.97	110424417	0.021	-0.008
Green	0.003078	0.936336	-0.000498	1.009715	0.97	110436157	0.048	-0.001
Red	-0.005008	0.977147	0.007260	0.969162	0.97	110435808	0.045	0.006
NIR	0.004743	1.019283	0.001070	0.949768	0.98	110415919	0.175	-0.008
NDVI	0.084002	0.955958	-0.055329	0.991325	0.97	110078583	0.534	-0.006
Sentinel-2A и GF-1C (29.07.2021, участки 4,5)								
Blue	0.015200	0.969269	-0.008884	0.796704	0.88	96539984	0.014	-0.015
Green	0.009569	0.897966	0.002416	0.857942	0.88	96644900	0.046	-0.005
Red	-0.001677	0.979848	0.008717	0.837294	0.90	96632565	0.041	0.026
NIR	0.017462	1.068253	0.009539	0.819969	0.93	96643875	0.192	-0.031
NDVI	0.056766	0.995691	0.008451	0.907475	0.95	96277266	0.676	0.054
Sentinel-2B и GF-1B (27.08.2019, участок 6)								
Blue	0.011585	0.782290	0.002701	0.674292	0.73	86065370	0.022	-0.007
Green	0.018698	0.772042	0.008292	0.670200	0.72	86074239	0.043	0.009
Red	0.010972	0.845320	0.008031	0.701475	0.77	86065175	0.039	-0.004
NIR	0.058668	0.796778	0.016610	0.798515	0.80	86071428	0.174	-0.024
NDVI	0.073915	0.881839	0.134861	0.785863	0.83	85335468	0.628	-0.0003

венничных лесов, а наиболее низкие значений для недавно полностью выгоревших территорий.

На 1 и 4 участках доля лесов преобладает, поэтому облако точек характеризуется более высокой плотностью значений в верхней части линии регрессии при слабом проявлении “хвоста” низких значений (см. рис. 5, а, 5, з). На втором участке гари были зарегистрированы только в 2018 г., то есть к дате съемки в 2021 году уже успели зарости, поэтому облако точек смещено к более высоким значениям NDVI (см. рис. 5, в), а близкое размещение большинства точек к линии регрессии скорее всего указывает на однородность ландшафтов.

Заметная корреляция ($R^2 = 0.72$) значений NDVI, но самая низкая среди остальных участков, характерна для 6 участка (см. рис. 5, е). Облако точек наиболее широко распределено по сравнению с другими участками вдоль линии регрессии и вдвое в области высоких значений. Это может быть обусловлено более высоким значением зенитного угла солнца по сравнению с аналогичными параметрами съемки других участков и влиянием фактора рельефа, так как в пределах участка наблюдаются значительные перепады высот, и для этого участка требуется более точная цифровая модель рельефа (DEM) для процедуры ортокоррекции.

ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа можно сказать, что для данной территории в целом наблюда-

ется высокая корреляция значений сопоставляемых информационных продуктов, полученных с китайских спутников серии GF-1 и эталонных информационных продуктов, полученных с европейских спутников серии Sentinel-2. Полученные регрессионные коэффициенты с высокой степенью надежности могут быть использованы при проведении комплексного анализа спутниковых данных для пересчета значений, полученных датчиком PMS, в соответствующие значения датчика MSI, в том числе с учетом камеры конкретного спутника (GF-1C или GF-1B, Sentinel-2A/B).

Более детальный анализ значений отражательной способности в соответствии с выделенными классами типов земного покрова показал, что в границах водных объектов обнаруживается самая высокая корреляция ($R^2 > 0.9$) в красном и зеленом каналах сопоставляемых данных для всех участков. Кустарниково-травянистая растительность и леса ожидаемо характеризуются значительным разбросом оценки R^2 , что скорее указывает на недостаточность детальности классов типов поверхности на данном масштабе исследования, а не более низкое качество целевых данных GF-1 по сравнению с эталонными данными Sentinel-2. Гари характеризуются более однородными свойствами отражательной способности, особенно в первые годы после пожара. Результаты сопоставления отражательной способности для выгоревших территорий в 2018 г., обнаруженных на всех участках также показывают высокую корреляцию ($R^2 > 0.8$) между сопо-

Таблица 4. Результаты расчета параметров линейной регрессии ($S_2 = a + b \cdot GF_1$) поканального сопоставления значений отражательной способности для пар Sentinel/GF для редколесных и плотных лиственных лесов для каждого участка

Канал	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>n</i>
S_GF_blue				
Участок 1	0.90701	0.0105347	0.85	61 370
Участок 2	0.899901	0.0098781	0.92	35 810
Участок 3	0.968669	0.0082635	0.93	40 200
Участок 4	0.937093	0.0148324	0.74	70 569
Участок 5	0.949352	0.0160418	0.76	44 682
Участок 6	0.748915	0.0124981	0.47	62 831
S_GF_green				
Участок 1	0.831124	0.0094321	0.84	61 370
Участок 2	0.840282	0.0086919	0.90	35 810
Участок 3	0.911711	0.0042325	0.93	40 200
Участок 4	0.88458	0.0101633	0.77	70 569
Участок 5	0.862361	0.0122013	0.71	44 682
Участок 6	0.684819	0.0228836	0.43	62 831
S_GF_red				
Участок 1	0.880098	-0.0022743	0.88	61 370
Участок 2	0.883354	-0.002557	0.93	35 810
Участок 3	0.97624	-0.0062672	0.95	40 200
Участок 4	0.982683	-0.0032121	0.83	70 569
Участок 5	0.958388	-0.0018776	0.79	44 682
Участок 6	0.774206	0.0132085	0.49	62 831
S_GF_NIR				
Участок 1	0.906313	0.0343815	0.71	61 370
Участок 2	1.00725	0.0087051	0.90	35 810
Участок 3	1.00442	0.0073841	0.92	40 200
Участок 4	1.02136	0.0280185	0.73	70 569
Участок 5	0.936809	0.0484889	0.70	44 682
Участок 6	0.683046	0.0818337	0.46	62 831

ставляемыми данными и меньший разброс в регрессионных коэффициентах по сравнению с лесными и кустарниково-травянистыми растительными покровами.

Анализ сопоставления индексов NDVI как в целом по изображениям, так и отдельно по участкам и типам земного покрова подтверждает хорошую связанность значений, получаемых с GF-1 и Sentinel-2 ($R^2 > 0.9$). Рассчитанные соотношения для пересчета значений на основе регрессионных моделей в дальнейшем могут быть использованы для совместного анализа продуктов NDVI.

Следует отметить, что корреляция данных для пары спутников Sentinel-2A и GF-1B (участки 1, 2, 3) выше, чем для пары Sentinel-2A и GF-1C (участки 4, 5), что вероятно, связано с большей шириной функций спектрального отклика датчи-

ка PMS, установленного на GF-1B. Корреляционные зависимости, рассчитанные по данным со спутников Sentinel-2B и GF-1B требуют уточнения из-за значительных неопределенностей, связанных с обработкой снимка GF-1B 2019 г., а также сложного рельефа на участке.

Наилучшие результаты сопоставления эталонных информационных продуктов Sentinel-2 и целевых информационных продуктов GF-1 были получены для 3 участка с коэффициентами $R^2 > 0.9$, что обусловлено использованием данных с пары спутников Sentinel-2A и GF-1B и особенностями распределения различных типов природных ландшафтов на участке.

Полученные соотношения для пересчета значений отражательной способности поверхности и NDVI в дальнейшем могут быть использованы

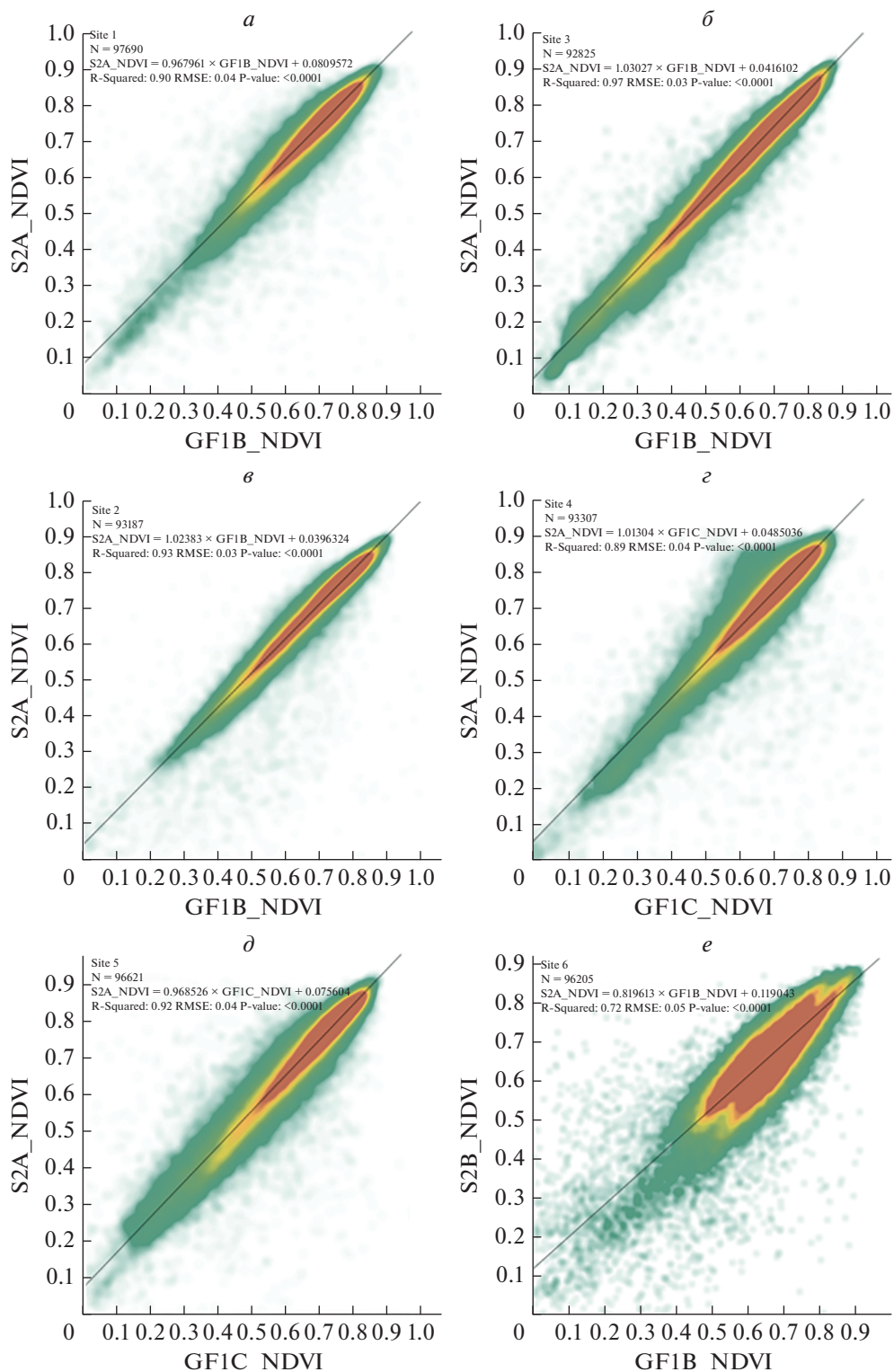


Рис. 5. Результаты сопоставления значений индекса NDVI, полученные по эталонным данным Sentinel-2 и целевым Gaofen-1 для каждого тестового участка.

для проведения совместного анализа европейских и китайских спутниковых данных в целях исследования удаленных и труднодоступных приарктических территорий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, MOST (Китай) и DST (Индия) в рамках научного проекта № 19-55-80021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М., Лавров С.А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 131–143.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3(39). С. 6–22. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-6-22>
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. №4. С. 4–24. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040028>
- Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. <https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>
- Бондур В.Г., Гордо К.А. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. <https://doi.org/10.7868/S020596141803003X>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 13–32. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>
- Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106. <https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>
- Пономарев Е.И. Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы: монография / Е.И. Пономарев, В.И. Харук, Е.Г. Швецов; Сибирский федеральный университет, Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2019. 220 с. ISBN 978-5-7638-4111-4.
- Протопопова В.В., Габышева Л.П. Пирологическая характеристика растительности в лесах Центральной Якутии и ее динамика в постпожарный период // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 25. № 3. 80–85.
- Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н. и др. Изучение климатической роли деградации подводной мерзлоты как фактора массивов выбросов основных парниковых газов в атмосферу над Восточно-арктическими морями России (78-й рейс НИС “академик Мстислав Келдыш”) // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген: Материалы конференции: электронный ресурс, Москва, 18–19 февраля 2019 года. Москва: Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН. 2019. С. 157–173.
- Черепанова Е.В., Феоктистова Н.В., Чудакова М.А. Анализ по космическим данным ТРОПОМІ аномалий концентраций метана над выгоревшими в 2018–2019 гг. территориями бореально-арктической зоны Восточной Сибири // Исслед. земли из космоса. 2020. № 5. С. 63–77. <https://doi.org/10.31857/S0205961420050048>
- Albarakat R., Lakshmi, V. Comparison of Normalized Difference Vegetation Index Derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes Between 2002 and 2018 // Remote Sensing. 2019. № 11, 1245. <https://doi.org/10.3390/rs11101245>
- Buchhorn M., Smets B., Bertels L., De Roo B., Lesiv M. et al. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Collection 3 Epoch 2015, Globe – Version V3. 0.1) [Data set]. 2020. Zitiert von: 63 Ähnliche Artikel Alle 4 Versionen
- Chander G., Aaron D., Mishra N., Shrestha A. Assessment of Spectral, Misregistration, and Spatial Uncertainties Inherent in the Cross-Calibration Study // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. 51. 1282–1296. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2228008>
- D’Odorico P., Gonsamo A., Damm A., Schaepman M. E. Experimental Evaluation of Sentinel-2 Spectral Response Functions for NDVI Time-Series Continuity // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. № 3. P. 1336–1348. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2235447>
- ESA GMQ Session, “ESA Workshop on Land Validation Strategy (30/11–1/12/2020): Highlights and Recommendations”.
- Feng L., Li J., Gong W. et al. Radiometric crosscalibration of Gaofen-1 WFV cameras using Landsat-8 OLI images: A solution for large view angle associated problems // Remote Sensing of Environment. 2016. 174. P. 56–68.
- Gao H., Gu X., Yu T., Liu L., Sun Y., Xie Y., Liu Q. Validation of the Calibration Coefficient of the GaoFen-1 PMS Sensor Using the Landsat 8 OLI // Remote Sensing, 2016. 8(2): 132. <https://doi.org/http://www.cresda.com/CN/Downloads> https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/>. <https://doi.org/10.3390/rs8020132>
- Li X.Y., Jin H.J., Jin X. et al. Influences of wildfires on the permafrost environment: a review // Advances in Climate Change Research. 2021. 12(1). P. 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.07.002>
- Liu Q., Yu T., Gao H. Radiometric Cross-Calibration of GF-1 PMS Sensor with a New BRDF Model // Remote Sensing. 2019. 11. 707. <https://doi.org/10.3390/rs11060707>
- Loew A., Bell W., Brocca L., Bulgin C.E., Burdanowitz J., Calbet X., Donner R.V., Ghent D., Gruber A., Kaminski T. et al. Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities // Reviews of Geophysics. 2017. 55. 779–817.
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // Ocean Science. 2018. V. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
- Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I.A. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment // Remote Sensing of

- Environment. 2014. 143. 85–96.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Sterckx S., Wolters E.* Radiometric Top-of-Atmosphere Reflectance Consistency Assessment for Landsat 8/OLI, Sentinel-2/MSI, PROBA-V, and DEIMOS-1 over Libya-4 and RadCalNet Calibration Sites // Remote Sensing. 2019. 11. 2253.
<https://doi.org/10.3390/rs11192253>
- Teillet P.M., Barker J.L., Markham B.L., Irish R.R., Fedosejevs G., Storey J.C.* Radiometric crosscalibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets // NASA Publications. 2001. 13.
- Teillet Philippe, Ren Xiaomeng.* Spectral band difference effects on vegetation indices derived from multiple satellite sensor data. Canadian Journal of Remote Sensing. 2008. 34. 159–173.
- Tsendbazar N., Tarko A., Li L., Herold M., Lesiv M., Fritz S., Maus V.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015–2019: Validation Report. 2020.
- Wang Q., Li J., Jin T., Chang X., Zhu Y., Li Y., Sun J., Li D.* Comparative Analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 Data for Retrieving Soil Moisture over Wheat Farmlands // Remote Sensing. 2020. 12(17): 2708.
<https://doi.org/10.3390/rs12172708>
- Wang Q., Li J., Jin T., Chang X., Zhu Y., Li Y., Sun J., Li D.* Comparative Analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 Data for Retrieving Soil Moisture over Wheat Farmlands // Remote Sensing. 2020. 12. 2708.
<https://doi.org/10.3390/rs12172708>
- Weier J., Herring D.* Measuring Vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory. 2000. Washington DC.
- Xiaoping Wu, Hanqiu Xu, Qiaoling Jiang.* Cross-Comparison of GF-1, GF-2 and Landsat-8 OLI Sensor Data [J] // Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2020. 45(1): 150–158.
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20190084>
- Hanqiu Xu, Liu Z., Guo Y.* Comparison of NDVI data between GF-1 PMS1 and ZY-3 MUX sensors // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2016. 32. 148–154.
<https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.08.021>

Cross-Sensor Comparison of Sentinel-2 and Gaofen-1B/C Satellite Products for Northern Taiga Forests

E. V. Cherepanova¹ and N. V. Feoktistova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

This study presents the results of the validation of information products of surface reflectance and NDVI, taking into account land cover types, obtained from the Chinese GF-1 PMS sensor data and the reference data of the European sensor MSI onboard Sentinel-2 (ESA) using the data intercomparison method. Based on the analysis, a high correlation of the compared GF-1 information products and reference Sentinel-2 information products was revealed. The resulting regression coefficients can be used with a high degree of reliability when conducting a comprehensive analysis of satellite data to recalculate the values obtained by the PMS sensor into the corresponding values of the MSI sensor, including taking into account the camera of a particular satellite (GF-1C or GF-1B).

Keywords: Remote sensing data validation, Gaofen-1B/C, surface reflectivity, NDVI, land cover

REFERENCES

- Anisimov O.A., Lavrov S.A., Zimov S.A., Volodin E.M.* Methane Emission in the Russian Permafrost Zone and Evaluation of Its Impact on Global Climate // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. V. 45. № 5. P. 377–385.
<https://doi.org/10.3103/S106837392005009X>
- Bogoyavlensky V.I., Kazanin A.G., Kishankov A.V., Kazanin G.A.* Earth degassing in the Arctic: comprehensive analysis of factors of powerful gas emission in the Laptev Sea. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2021. V. 11. № 2. P. 178–194. (In Russian).
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-178-194>
- Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. (In Russian).
<https://doi.org/10.1134/S0001433815090054>
- Bondur V.G.* Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1091.
<https://doi.org/10.1134/S0001433816090103>
- Bondur V.G., Gordo K.A.* satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2018. V. 54. № 9. P. 955–965.
<https://doi.org/10.1134/S0001433818090104>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.V.* Satellite monitoring of wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation cover in the federal districts of the Russian Federation // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. № 9. P. 1238–1253.
<https://doi.org/10.1134/S000143381909010X>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Mokhov I.I., Sitnov S.A.* Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20-Year Changes // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 492. № 1. P. 370–375. (In Russian).
<https://doi.org/10.1134/S1028334X20050049>
- Ponomarev E.I.* Monitoring prirodnykh pozharov v Sibiri: dinamika gorimosti v sovremennom klimате, prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti, kharakteristiki i prognozy: monografiya / E.I. Ponomarev, V.I. Kharuk, Ye.G. Shvetsov; Sibirskiy federal'nyy universitet, Institut lesa im. V.N. Sukacheva Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk – obosoblennoye podrazdeleniye FITS KNTS SO RAN. – Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet, 2019. 220 s. ISBN 978-5-7638-4111-4. (In Russian).
- Protopopova V.V., Gabysheva L.P.* Pirologicheskaya kharakteristika rastitel'nosti v lesakh Tsentral'noy Yakutii i yeye dinamika v postpozharный period // Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki. T. 25. № 3. 2018, 80–85. (In Russian).

- Semiletov I.P., Dudarev O.V., Dmitrevskiy N.N. et al.* Izucheniye klimaticheskoy roli degradatsii podvodnoy merzloty kak faktora massirovannykh vybrosov osnovnykh parnikovyykh gazov v atmosferu nad Vostochno-arkticheskimi moryami Rossii (78-y reys NIS “akademik Mstislav Keldysh”) // Itogi ekspeditsionnykh issledovaniy v 2018 godu v Mirovom okeane, vnutrennikh vodakh i na arhipelage Shpitsbergen: Materialy konferentsii: elektronnyy resurs, Moskva, 18–19 fevralya 2019 goda. Moskva: Institut morskikh biologicheskikh issledovaniy im. A.O. Kovalevskogo RAN, 2019. S. 157–173. (In Russian).
Cherepanova E.V., Feoktistova N.V., Chudakova M.A. Analiz po kosmicheskim dannym TROPOMI anomalii kontsentratsiy metana nad vygorevshimi v 2018–2019 gg. territoriyami boreal’no-arkticheskoy zony Vostochnoy Sibiri // Issledovaniye zemli iz kosmosa. 2020. № 5. S. 63–77. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050048>.
- Albarakat R., Lakshmi V.* Comparison of Normalized Difference Vegetation Index Derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes Between 2002 and 2018 // *Remote Sens.* 2019, 11, 1245.
<https://doi.org/10.3390/rs11101245>
- Buchhorn M., Smets B., Bertels L., De Roo B., Lesiv M. et al.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Collection 3 Epoch 2015, Globe – Version V3. 0.1 [Data set], 2020. Zitiert von: 63 Ähnliche Artikel Alle 4 Versionen
- Chander Gyanesh, Aaron David, Mishra Nischal, Shrestha Alok.* Assessment of Spectral, Misregistration, and Spatial Uncertainties Inherent in the Cross-Calibration Study // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2013. V. 51. 1282–1296. 10.1109/TGRS.2012.2228008.
- D’Odorico P., Gonsamo A., Damm A., Schaepman M.E.* Experimental Evaluation of Sentinel-2 Spectral Response Functions for NDVI Time-Series Continuity // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* V. 51. № 3. P. 1336–1348. March 2013.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2235447>.
- ESA GMQ Session, “ESA Workshop on Land Validation Strategy (30/11–1/12/2020): Highlights and Recommendations”.
- Li J., Feng L., Pang X., Gong W., Zhao X.* Radiometric cross-calibration of Gaofen-1 WFV cameras using Landsat-8 OLI images: A solution for large view angle associated problems // *Remote Sensing of Environment.* 2016. 174. P. 56–68.
- Gao H., Gu X., Yu T., Liu L., Sun Y., Xie Y., Liu Q.* Validation of the Calibration Coefficient of the GaoFen-1 PMS Sensor Using the Landsat 8 OLI // *Remote Sensing,* 2016, 8(2): 132.
<https://doi.org/10.3390/rs8020132>
<http://www.cresda.com/CN/Downloads>.
https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR.
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/>.
- Li X.Y., Jin H.J., Jin X. et al.* Influences of wildfires on the permafrost environment: a review // *Advances in Climate Change Research.* 2021. 12(1). P. 29–47.
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.07.002>.
- Liu Q., Yu T., Gao H.* Radiometric Cross-Calibration of GF-1 PMS Sensor with a New BRDF Model // *Remote Sens.* 2019, 11, 707.
<https://doi.org/10.3390/rs11060707>
- Loew A., Bell W., Brocca L., Bulgin C.E., Burdanowitz J., Calbet Donner R.V., Ghent D., Gruber A., Kaminski T. et al.* Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities // *Reviews of Geophysics.* 2017. 55. 779–817.
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science.* 2018. V. 14. № 1. P. 87–103.
<https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>.
- Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. A.* The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment // *Remote Sensing of Environment.* 2014. 143. 85–96.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Sterckx S., Wolters E.* Radiometric Top-of-Atmosphere Reflectance Consistency Assessment for Landsat 8/OLI, Sentinel-2/MSI, PROBA-V, and DEIMOS-1 over Libya-4 and RadCalNet Calibration Sites // *Remote Sensing,* 2019, 11, 2253.
<https://doi.org/10.3390/rs11192253>
- Teillet P.M., Barker J.L., Markham B.L., Irish R.R., Fedosejevs G., Storey J.C.* Radiometric crosscalibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets // *NASA Publications.* 2001. 13.
- Teillet P., Ren X.* Spectral band difference effects on vegetation indices derived from multiple satellite sensor data // *Canadian Journal of Remote Sensing.* 2008. 34. 159–173.
- Tsendbazar N.E., Tarko A., Li L., Herold M., Lesiv M., Fritz S., Maus V.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015–2019: Validation Report. 2020.
- Wang Q., Li J., Jin T., Chang X., Zhu Y., Li Y., Sun J., Li D.* Comparative Analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 Data for Retrieving Soil Moisture over Wheat Farmlands // *Remote Sensing,* 2020. 12(17): 2708.
<https://doi.org/10.3390/rs12172708>
- Wang Q., Li J., Jin T., Chang X., Zhu Y., Li Y., Sun J., Li D.* Comparative Analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 Data for Retrieving Soil Moisture over Wheat Farmlands // *Remote Sensing.* 2020. 12. 2708.
<https://doi.org/10.3317270890/rs12>
- Weier J., Herring D.* Measuring Vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory, Washington DC. 2000.
- Xiaoping Wu, Hanqiu Xu, Qiaoling Jiang.* Cross-comparison of GF-1, GF-2 and Landsat-8 OLI Sensor Data // *Geomatics and Information Science of Wuhan University,* 2020, 45 (1). P. 150–158.
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20190084>
- Hanqiu Xu, Liu Z., Guo Y.* Comparison of NDVI data between GF-1 PMS1 and ZY-3 MUX sensors // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.* 2016. 32. 148–154.
<https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.08.021>.