

Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса

С. С. Шинкаренко^{1,2}, С. А. Барталев¹, А. А. Васильченко²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия
E-mail: shinkarenkos@vifanc.ru*

Защитные лесные насаждения (ЗЛН) — важный компонент устойчивого функционирования агроландшафтов, препятствующий развитию процессов водной и ветровой эрозии. В последние десятилетия темпы создания ЗЛН в России многократно снизились по сравнению с серединой прошлого века. При этом в силу естественных и антропогенных факторов существующие ЗЛН подвержены процессам масштабной деградации, в то время как информация об их актуальном состоянии практически отсутствует. Существующие информационные продукты типов земного покрова и мониторинга лесов охватывают ЗЛН лишь частично. Полезащитные лесные полосы, имеющие ширину 10–20 м, очень фрагментарно отражены на существующих глобальных и национальных спутниковых картах лесов. Известные подходы к картографированию ЗЛН основаны на экспертном дешифрировании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сверхвысокого пространственного разрешения или наземной съёмке с помощью GPS-приёмников. Такие методы трудоёмки и не могут применяться на больших территориях. В работе предложен новый метод картографирования ЗЛН на основе разновременных спутниковых данных ДЗЗ с использованием бисезонного индекса леса BSFI (*англ.* Bi-Season Forest Index), вычисляемого как нормализованная разница минимального значения NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) за вегетационный сезон и максимального альбедо, определяемого в зимний период при наличии снежного покрова на земной поверхности. Пиксели с положительными значениями данного индекса могут быть отнесены к покрытым древесной растительностью территориям. Проведено сравнение площади ЗЛН, выделенной на основе BSFI по данным спутниковой съёмки инструментом Sentinel-2, с результатами экспертного дешифрирования детальных спутниковых изображений и широко распространённых информационных продуктов спутникового картографирования земного покрова. Сравнительный анализ показал наличие тесной связи получаемых на основе данных Sentinel-2 результатов с оценками площади ЗЛН по материалам экспертного дешифрирования детальных спутниковых изображений, которая характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0,99$, а также позволил установить величину точности выделения лесов на основе данного индекса на уровне 91 %. Относительная ошибка выделения полезащитных лесных полос в зоне 50 м вокруг границ полей составила 9 %. Предложенный подход рекомендуется для картографирования ЗЛН в малолесных регионах, где возможно получение спутниковых изображений земной поверхности с наличием снежного покрова.

Ключевые слова: полезащитные лесополосы, древесно-кустарниковая растительность, агроландшафты, агролесомелиорация, дистанционное зондирование, Sentinel-2, NDVI

Одобрена к печати: 16.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222

Защитные лесные насаждения и проблемы их мониторинга

Большая часть лесостепной и степной зоны распашана, что привело к интенсификации водной и ветровой эрозии почв, масштабного проявления пыльных бурь. В настоящее время этим процессам подвержено около 65 % пахотных земель и 50 % пастбищ России. По разным оценкам площадь деградированных сельскохозяйственных земель составляет от 30 до 100 млн га в 27 субъектах Российской Федерации. Проблема деградации и опустынивания

земель актуальна для целого ряда стран, включая Россию, Китай, государства Средней Азии и Европейского Союза (Национальный..., 2019). Одной из ключевых причин развития процессов деградации агроландшафтов представляется сокращение площади лесов: за последние полтора столетия лесистость чернозёмной зоны России снизилась с 30–40 до 5–15 %. Противостоять негативным явлениям призваны защитные лесные насаждения (ЗЛН), массово создававшиеся в 1950–1970 гг. Всего на сельскохозяйственных землях было создано более 5 млн га ЗЛН разного назначения (полезащитные, прибалочные, приовражные, водоохранные, пастбищезащитные и др.), но на начало 2000-х гг. их площадь оценивалась приблизительно в 2,7 млн га. В конце XX – начале XXI вв. в России ежегодно создавалось всего около 20 тыс. га ЗЛН, что недостаточно для полноценного предотвращения процессов деградации. Например, в США, Канаде и Китае этот показатель превышает 250–300 тыс. га в год (Стратегия..., 2017; Rulev, Pugacheva, 2019).

Защитные лесные насаждения способствуют снижению интенсивности водной эрозии, дефляции, испарения, повышают плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур, связывают углерод, имеют высокую рекреационную ценность и способствуют повышению биоразнообразия агроландшафтов (Агролесомелиорация..., 2006). В то же время значительная часть ЗЛН находится в бесхозном состоянии, землепользователи неохотно включают их в границы земельных участков (Тимерьянов, 2010). Полезащитные лесные полосы (ПЗЛП) располагаются на землях сельскохозяйственного назначения, не входят в Государственный лесной фонд и не проходят регулярной инвентаризации.

Для анализа состояния лесов широко применяются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Барталев и др., 2005; Isaev et al., 2014). Тем не менее инвентаризация ЗЛН по данным ДЗЗ затруднена, поскольку требует использования спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, так как ЗЛН в основном представлены в виде полос и лент шириной до 50–60 м. Наибольшая сложность возникает при дешифрировании ПЗЛП, ширина которых часто не превышает 12–15 м. По этой причине большинство спутниковых информационных продуктов, характеризующих типы земного покрова, не отражают наличие ПЗЛП и других протяжённых ЗЛН. Несмотря на развитость технологий спутникового картографирования лесов (Барталев и др., 2016; Yu et al., 2021), мониторинга пожаров (Лупян и др., 2017; Kotel'nikov et al., 2020) и ветровалов (Шихов, Дремин, 2021), оценки запаса стволовой древесины (Жарко и др., 2018) и проективного покрытия крон (Ховратович и др., 2019; Hansen et al., 2013), анализа тенденций зарастания хвойными и лиственными лесами неиспользуемых сельскохозяйственных земель (Терехин, 2020) и решения других задач лесного хозяйства, технологии дистанционного выявления и оценки ПЗЛП и ЗЛН проработаны ещё слабо.

Проводимые исследования состояния ПЗЛП опираются преимущественно на визуальное дешифрирование изображений сверхвысокого пространственного разрешения, в том числе находящихся в открытом доступе (например, сервис Google Планета Земля (*англ.* Google Earth)), картографические материалы (Аникеев и др., 2018; Антонов, 2020; Нарожняя, Чендев, 2020; Рулев и др., 2014; Ткаченко, Кошелев, 2017; Koshelev et al., 2021) либо на результаты наземной съёмки с помощью GPS-приёмников (*англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования) (Smirnov et al., 2021; Vassilev et al., 2019). Построение технологий регулярного мониторинга состояния ЗЛН на подобных данных практически не реализуемо, а визуальное дешифрирование спутниковых изображений трудоёмко. В настоящее время функционирует спутниковая система ДЗЗ Sentinel-2, позволяющая получать многоспектральные данные пространственного разрешения 10 м с частотой 2–3 раза в неделю, а глубина архива данных на текущий момент превысила 5 лет у Sentinel-2В и 7 лет у Sentinel-2А. Размер пикселя получаемых системой Sentinel-2 изображений земной поверхности сопоставим с шириной ПЗЛП и значительно меньше ширины противоэрозионных ЗЛН и Государственных защитных лесных полос (ГЗЛП), что создаёт необходимые предпосылки для потенциального применения этих данных для картографирования ЗЛН (Begimova, 2021).

Цель исследований состоит в разработке подхода для картографирования ЗЛН по материалам спутниковой съёмки космического аппарата (КА) Sentinel-2 с использованием разносезонных спутниковых изображений, получаемых как в течение вегетационного сезона, так

и в зимнее время при наличии снежного покрова на земной поверхности, что даёт дополнительные преимущества при дистанционном изучении древесной растительности (Барталев и др., 2022б).

Обоснование использования разносезонных спутниковых изображений для картографирования ЗЛН

На спутниковых изображениях обрабатываемые пахотные земли наиболее сильно контрастируют с ЗЛН после вспашки, созревания культур или уборки урожая (Рулев и др., 2016; Терехин, 2017). Окружающая естественная травянистая растительность может быть отделена от ЗЛН по данным ДЗЗ в то время, когда её вегетационный период завершён, но деревья остаются в облиственном состоянии (Шинкаренко, Барталев, 2020). Также выделение ЗЛН возможно по зимним изображениям снежного покрова, поскольку поля и травянистая растительность в этот период будут скрыты под снегом. Зимние спутниковые изображения земной поверхности с наличием снежного покрова уже находят эффективное применение для решения различных задач мониторинга лесов (Барталев и др., 2016, 2022б; Жарко и др., 2018).

Поскольку состояние пахотных земель зависит от севооборотов, то разделить древесно-кустарниковую растительность (ДКР), пашни и естественный травостой по одномоментному спутниковому изображению на основе значений спектрально-яркостных признаков в фиксированный момент времени затруднительно. А по спутниковым изображениям, полученным в зимний период при наличии снежного покрова на земной поверхности, к ДКР могут быть отнесены поля с неубранными пожнивными остатками или урожаем, возвышающиеся над снегом объекты, к примеру дороги на насыпях. Таким образом, с учётом вышеизложенных предпосылок разделение ДКР, сельскохозяйственных культур и естественной травянистой растительности может быть основано на комплексном использовании разновременных спутниковых изображений, полученных как при наличии снежного покрова, так и в вегетационный период. При этом по данным разновременных измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова за пределами зимнего сезона целесообразно получение композитного изображения на основе минимизации значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) за период спутниковых наблюдений (Рулев и др., 2016). При анализе временной серии данных с минимизацией NDVI возрастает вероятность включения в композитное изображение пикселей, относящихся к убраным или вспаханым полям, высохшей естественной растительности. При этом соответствующие ДКР минимизированные значения NDVI будут существенно превышать характерные величины данного показателя для сельскохозяйственных культур в начале или конце вегетационного периода, открытой почвы, антропогенных и водных объектов. В то же время снежный покров, маскированный кронами ДКР, будет менее выражен на зимних спутниковых изображениях: значения нормализованного разностного индекса снега NDSI (*англ.* Normalized Difference Snow Index) и альbedo в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах здесь будут ниже (Hall et al., 1995; Klein et al., 1998).

Таким образом, для наилучшего разделения покрытых и непокрытых ДКР территорий нужно использовать композитное изображение минимальных значений NDVI за вегетационный сезон и максимальное значение альbedo или NDSI за зимний период. При этом обязательно, чтобы все данные относились к одному вегетационному сезону: включение ряда из нескольких лет позволит с большей вероятностью получить наиболее контрастные значения указанных показателей. Кроме того, часто наличие облачности или отсутствие снежного покрова делает составление ежегодных композитных спутниковых изображений затруднительным.

Чем больше разница между показателями минимизированного NDVI и NDSI или альbedo снежного покрова, тем сильнее проявляется влияние древесной растительности и, следовательно, имеется больше оснований для отнесения соответствующих территорий к покрытым ДКР. Альbedo может принимать значения от 0 до 1, а NDVI и NDSI — от -1 до 1. Использование нормализованной разницы NDVI и альbedo (или NDSI) позволяет получить

новый индекс, значения которого также будут лежать в диапазоне от -1 до 1 , при этом предварительная фильтрация отрицательных значений NDVI позволяет исключить из анализа водные и не покрытые снегом антропогенные объекты. Схема расчёта предложенного бисезонного индекса BSFI (англ. Bi-Season Forest Index) показана на рис. 1.

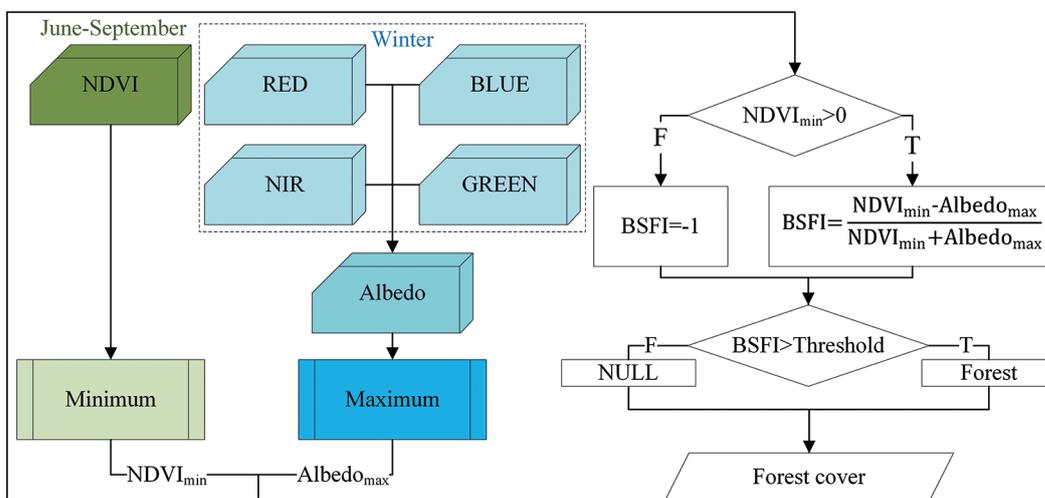


Рис. 1. Схема расчёта индекса BSFI для картографирования по разновременным спутниковым изображениям защитных лесных насаждений

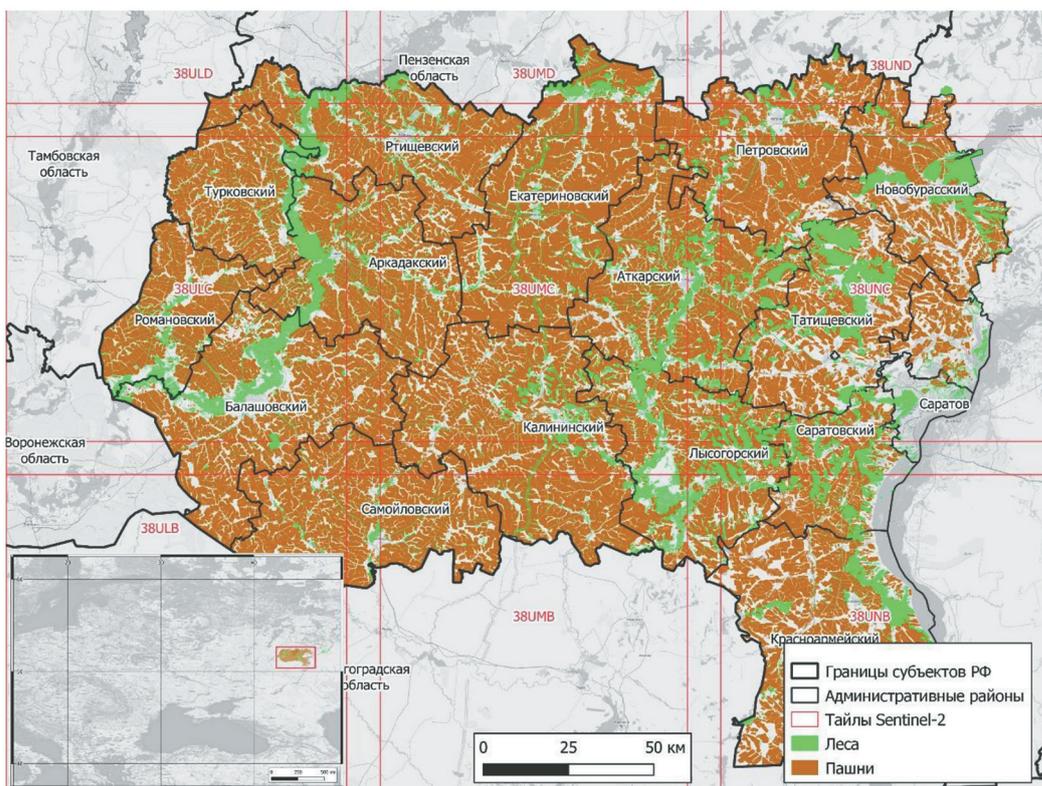


Рис. 2. Регион исследований

В качестве региона исследований выбраны 15 правобережных районов Саратовской обл. общей площадью 3,6 млн га, расположенные в подзоне южных и типичных чернозёмов (рис. 2). Доминирующими древесными породами в ЗЛН здесь преимущественно выступают дуб черешчатый или берёза повислая, сопутствующими — ясень зелёный, клёны остро-

лиственный и ясенелистный, яблоня лесная, вяз обыкновенный и др. Также при создании ЗЛН использовались кустарники: карагана древовидная (акация жёлтая), жимолость татарская, лещина, боярышник и др. Существуют ЗЛН из сосны обыкновенной. В долинах рек Хопер и Медведицы расположены пойменные леса преимущественно из дуба черешчатого, осины, тополя (Проездов и др., 2016).

Исследование основано на спутниковых данных Sentinel-2 уровня обработки L2A (BOA — *англ.* Bottom of atmosphere), прошедших атмосферную коррекцию и радиометрическую калибровку. Выбор указанных данных обусловлен наилучшим пространственным разрешением среди находящихся в открытом доступе данных. В результате были рассчитаны значения BSFI на основе разницы NDVI и альбедо, а также NDVI и NDSI — BSFI (NDSI). Преимуществом вычисления BSFI на основе альбедо, а не NDSI представляется более высокое пространственное разрешение, так как для расчёта NDSI требуется коротковолновый ИК-канал с разрешением 20 м. Даты использованных изображений представлены в *таблице*. Обработка данных осуществлялась в программе QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information Systems), спутниковые данные получены с помощью сервиса «Vera» (Loupian et al., 2022).

Даты использованных спутниковых изображений Sentinel-2

Тайл	Зима	Июнь	Август	Сентябрь
T38ULB	20.02.2019	05.06.2019	21.08.2019	05.09.2019
T38ULC	23.01.2019	05.06.2019	30.08.2020	13.09.2019
T38ULD	23.01.2019	05.06.2019	24.08.2019	10.09.2019
T38UMB	23.01.2019	02.06.2019	21.08.2019	04.09.2020 07.09.2020
T38UMC	23.01.2019	16.06.2020	30.08.2020	04.09.2020
T38UMD	23.01.2019	11.06.2020	30.08.2020	24.09.2020
T38UNB	19.02.2019	04.06.2019	21.08.2019	04.09.2020
T38UNC	23.01.2019	14.06.2019	26.08.2019	04.09.2020
T38UND	23.01.2019	16.06.2020	30.08.2020	24.09.2020

Оценка точности выделения ЗЛН на основе нормализованной разницы NDVI и альбедо в зимний период

Для проверки результатов картографирования ЗЛН по предложенному алгоритму использовались данные типов земного покрова за 2020 г. GLC30 (*англ.* GlobeLand30 dataset) разрешения 30 м (Chen et al., 2014), ESRI (*англ.* Environmental Systems Research Institute) разрешения 10 м (Karra et al., 2021), Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA) разрешения 10 м (Zanaga et al., 2021), продукт проективного покрытия леса Global Forest Change (GFC) v. 1.8 (Hansen et al., 2013). Продукт GFC имеет разрешение 30 м и содержит данные о проективном покрытии леса в каждом пикселе на 2000 г., год исчезновения леса с 2001 по 2020 г. и факт появления или восстановления леса на участках, где его не было в 2000 г. Из анализа были исключены пиксели, на которых лесной покров был утрачен. Пиксели с восстановленным лесным покровом анализировались отдельно, так как сведения о проективном покрытии леса в них отсутствуют.

Также выполнено экспертное дешифрирование ЗЛН и границ сельскохозяйственных земель на территории исследований по данным сверхвысокого разрешения Google Earth (<https://www.google.ru/intl/ru/earth>). Леса и ЗЛН выделены в 10 районах, сельскохозяйственные земли — в 15 районах региона исследований. Статистические данные приводятся согласно Национальному атласу почв РФ (<https://soil-db.ru/soilatlas>).

На первом этапе для векторных объектов, созданных с помощью визуального дешифрирования данных сверхвысокого разрешения, были определены средние значения BSFI

и показателей, на основе которых он рассчитывается (рис. 3а). Леса характеризуются наибольшими значениями минимизированных за вегетационный сезон NDVI и минимальными значениями альbedo зимой. Индекс NDSI лесов имеет существенно большие значения, чем альbedo, поэтому подходит в меньшей степени. Значения BSFI на основе альbedo в лесах в 2–3 раза превышают BSFI на основе NDSI, при том что сельскохозяйственные земли и антропогенные объекты оба показателя отделяют примерно одинаково. Это ещё одна причина, кроме более высокого пространственного разрешения, по которой рекомендуется использовать именно альbedo в зимний период, а не показатель NDSI. Данный факт может быть связан с большей зависимостью NDSI от состояния снежного покрова (Hall et al., 1995; Klein et al., 1998), также альbedo под пологом леса может дополнительно снижаться не только из-за перекрытия снега тёмными кронами, но и за счёт теней от деревьев. Далее под BSFI понимается только рассчитанный на основе разницы NDVI и альbedo показатель.

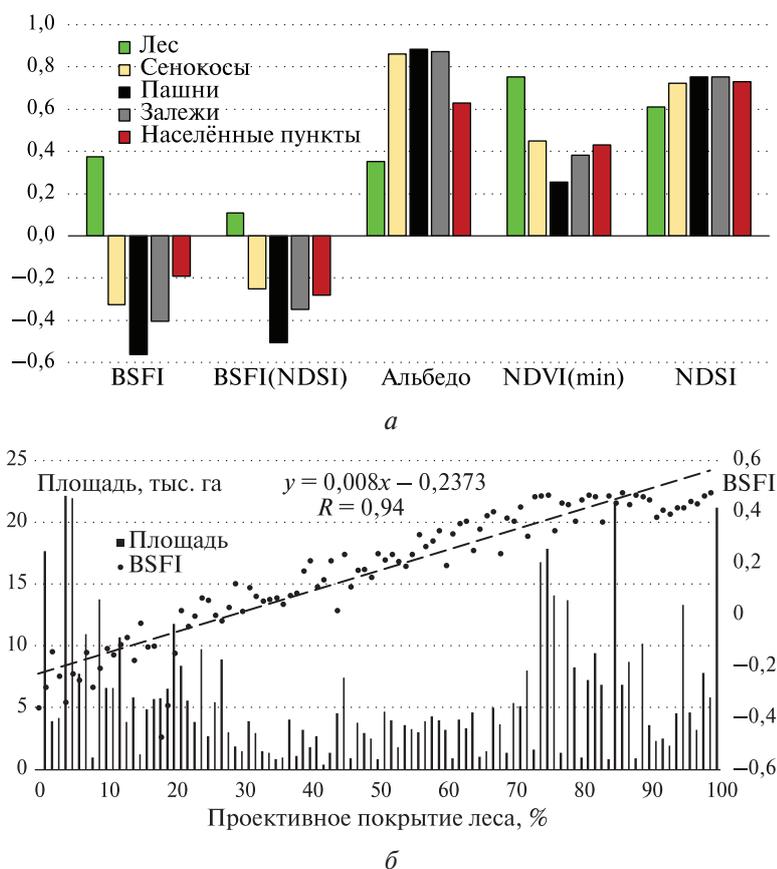


Рис. 3. Средние значения BSFI, альbedo, минимального NDVI и NDSI для разных категорий земель (по вертикальной оси — значения указанных показателей) (а); сопоставление проективного покрытия леса по данным (Hansen et al., 2013) и значений BSFI (б)

На следующем этапе были рассчитаны значения BSFI для пикселей GFC (рис. 3б). Коэффициент корреляции проективного покрытия GFC и BSFI составил 0,94. Для пикселей GFC с покрытием леса более 20 % все средние значения BSFI положительные, а при проективном покрытии леса GFC до 20 % большая часть пикселей имеет отрицательные значения BSFI. Это может быть вызвано двумя причинами: пропусками лесных пикселей при обработке данных BSFI и ложно выделенными участками лесов по данным GFC. К лесам могут ошибочно относиться высокопродуктивные травянистые сообщества и сельскохозяйственные культуры. Для устранения этого эффекта в дальнейшем кроме непосредственно данных GFC анализировалась также выборка пикселей GFC со значениями проективного покрытия больше 20 % (GFC20).

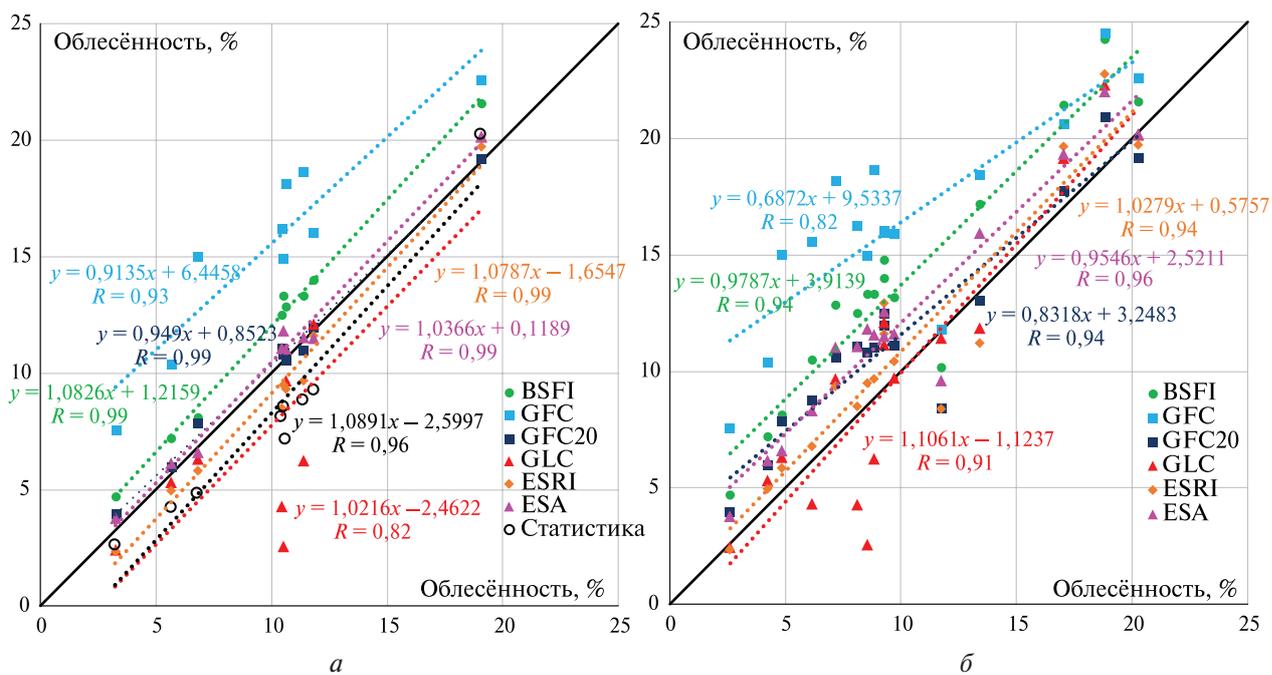


Рис. 4. Сравнение значений лесистости муниципальных районов, полученных по разным данным, с результатами экспертного дешифрирования (а) и данными официальной статистики (б)

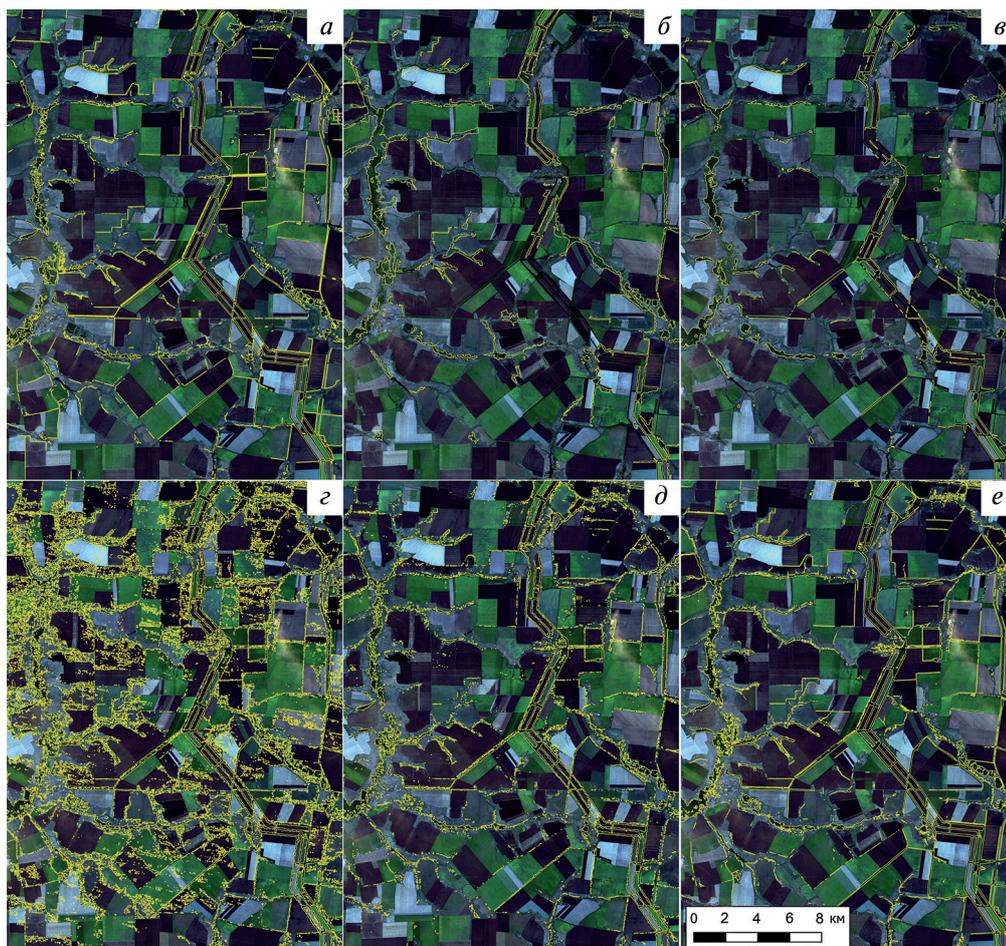


Рис. 5. Контуры защитных лесных насаждений по данным разных продуктов: а — экспертное дешифрирование; б — GLC, в — ESRI, г — GFC, д — GFC2, е — BSFI; спутниковое изображение Sentinel-2 от 4 сентября 2020 г.

Далее рассчитывались показатели лесистости для каждого исследуемого муниципального района (отношение пикселей леса к общему количеству пикселей в границах районов) по разным данным (рис. 4, см. с. 213). Наиболее сильная связь выявлена между результатами дешифрирования и данными, полученными на основе BSFI, GFC20, ESRI и ESA.

Сильно завышены оценки лесистости по данным GFC, при этом график GFC20 практически совпадает с данными дешифрирования материалов сверхвысокого разрешения. Это свидетельствует о большом количестве ложно выявленных участков леса по данным GFC при покрытии пикселей пологом менее 20 %. Это подтверждает рис. 5 (см. с. 213), иллюстрирующий большое количество пикселей GFC, которые попадают на сельскохозяйственные поля. При фильтрации пикселей с проективным покрытием леса до 20 % разница с BSFI и результатами дешифрирования не так существенна. Превышение значений лесистости по данным BSFI по сравнению с результатами дешифрирования может быть вызвано совокупностью нескольких факторов: ложное определение леса по данным BSFI либо не выделенные при экспертном дешифрировании небольшие группы деревьев, лесные насаждения в населённых пунктах, сады и ДКР внутри контуров полей, которые могли быть детектированы по значениям BSFI. Также могут оказывать влияние граничные пиксели ЗЛН, занятые лесом не полностью, вся площадь которых была отнесена к лесу. Пропуски леса связаны в основном с неудовлетворительным состоянием древостоев ЗЛН.

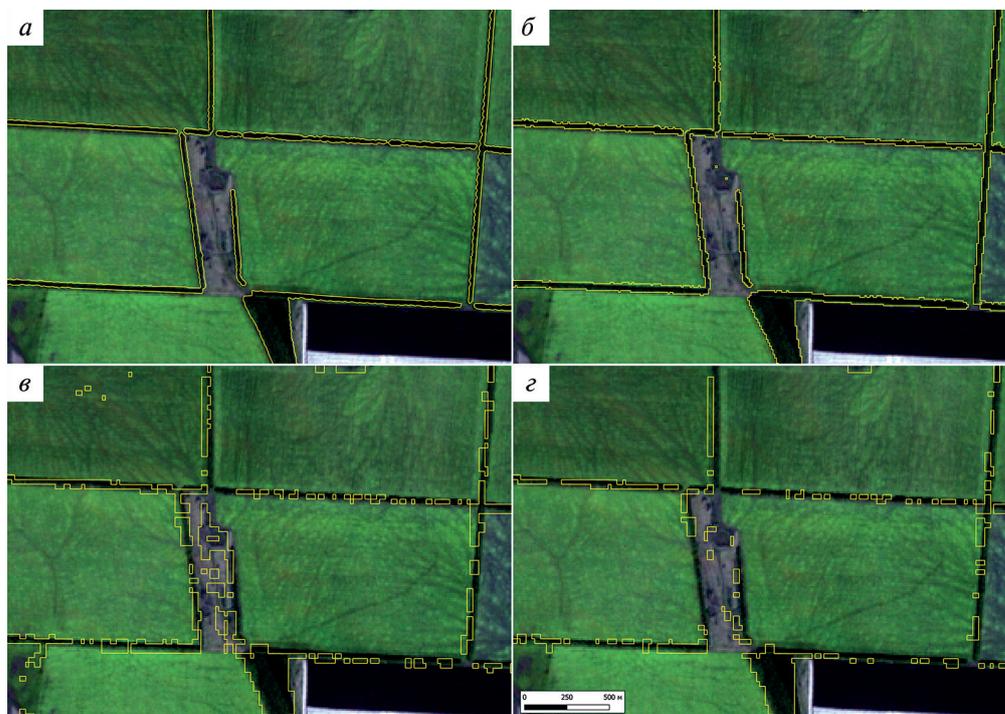


Рис. 6. Фрагменты карт ЗЛН по разным данным: а — экспертное дешифрирование, б — BSFI, в — GFC, г — GFC20; спутниковое изображение Sentinel-2 от 4 сентября 2020 г.

Проходящая через регион исследований ГЗЛП «Пенза – Каменск», состоящая из трёх лент шириной 60 м (Rulev, Pugacheva, 2019), присутствует на всех использованных информационных продуктах, тем не менее по данным GLC пропущены участки насаждений, составляющие примерно половину площади ГЗЛП. У данных ESRI также имеются пропуски. Оба продукта практически не охватывают ПЗЛП, но включают байрачные и пойменные леса. На рис. 6 показан пример выделения ПЗЛП с помощью разных данных, продукты ESRI, ESA и GLC не содержат здесь относящихся к лесу пикселей.

Кросс-валидация результатов картографирования лесных насаждений на основе экспертного дешифрирования, использования индекса BSFI и информационных продуктов ESA

и GFC20 показала общую точность 96, 94 и 95 % соответственно. Высокое значение общей точности обусловлено большими площадями, которые не заняты лесом и правильно были отнесены к нелесным по обоим наборам данных. Точность производителя при выделении леса по данным BSFI составила 91 %, по данным ESA — 62 %, по данным GFC20 — 76 %. Точность пользователя по данным BSFI равна 75 %, ESA — 54 %, GFC20 — 73 %. Таким образом, предложенный подход намного точнее позволяет идентифицировать лесные насаждения по сравнению с GFC20 при сопоставимом уровне ложного выделения покрытых древесной растительностью территорий.

Анализ облесённости пахотных земель региона исследований

Для оценки эффективности использованных в работе подходов к картографированию ПЗЛП проведена оценка облесённости пахотных земель исследуемого региона. Границы пахотных земель, полученные на основе экспертного дешифрирования, были объединены в укрупнённые объекты, вокруг которых построены буферные зоны шириной 50 м, не включающие пашни. Далее рассчитывалась облесённость территорий буферных зон как отношение покрытой лесом площади внутри зоны к её общей площади (рис. 7). Доля площади ПЗЛП в зоне 50 м вокруг полей (без учёта их площади) составляет 15–35 %, что свидетельствует о высоком потенциале данных земель для создания новых ЗЛН. Облесённость пахотных земель с учётом их площади в исследованных районах не превышает 3–4 %, в то время как оптимальным значением этого показателя считается величина 5–8 % (Агролесомелиорация..., 2006).

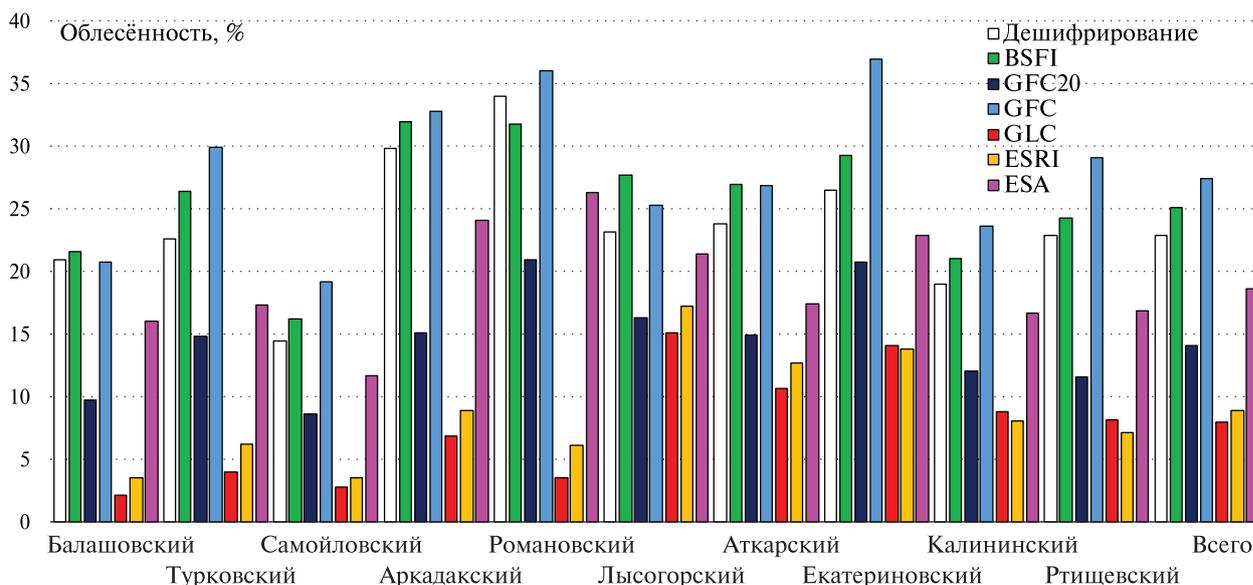


Рис. 7. Сопоставление значений показателя облесённости 50-метровой буферной зоны вокруг пахотных земель по различным данным

Наименьшая относительная ошибка оценки облесённости пахотных земель достигнута при использовании данных BSFI, составив величину 9 %, хотя для отдельных районов она изменялась в интервале значений от –7 до 20 %. Данные GFC20 показали сильный недоучёт ПЗЛП: –39 % (диапазон значений ошибок для отдельных районов составил от –54 до –22 %). GFC без фильтрации малолесных пикселей, наоборот, характеризуется превышением площади ПЗЛП на 20 % (значения ошибки от –1 до 40 %), а данные ESA — уменьшением на 19 %. Проверка методом кросс-валидации показала общую точность 90 % для результатов дешифрирования и при использовании данных BSFI (точность производителя — 81 %, пользователя — 72 %), 87 % — по данным ESA (точность производителя — 55 %, пользователя — 65 %) и 84 % — для данных GFC20 (точность производителя — 44 %, пользователя — 64 %). Более

низкая точность выделения ЗЛН связана с малой шириной ПЗЛП и наличием распавшихся или усыхающих лесных насаждений. Данные официальной статистики по покрытой лесом площади и ДКР на нелесных землях занижены относительно практически всех используемых информационных продуктов. По общей лесистости лучше согласуются с результатами дешифрирования спутниковых изображений сверхвысокого разрешения результаты, полученные на основе информационных продуктов GFC20, BSFI. Для экспресс-оценки площади лесов в малолесных регионах использование этих данных приводит к примерно одинаковым результатам. Поскольку площадь ДКР на нелесных землях в общей площади лесов региона исследований составляет всего 20–25 %, то эффективность GFC20 и ESRI основана в первую очередь на точном выделении лесных массивов. Для оценки защитной облесённости пахотных земель наиболее точные результаты достигаются при использовании данных BSFI.

Перспективы развития предложенного подхода для картографирования ЗЛН

Разработанный подход не ограничивается использованием данных Sentinel-2 для картографирования ПЗЛП. Перспективным направлением является идентификация лесов на основе BSFI в малолесных регионах по данным Landsat. Наличие почти полувекового архива миссии Landsat позволяет провести ретроспективный анализ динамики лесопокрытой площади, в том числе за счёт создания ЗЛН, вырубок, пожаров и других факторов деградации лесов. Кроме анализа непосредственно данных BSFI, возможно их включение в композитные многоканальные изображения для последующей автоматизированной обработки.

Сопоставление данных BSFI и GFC показало тесную связь между проективным покрытием древесной растительности и значениями индекса. В дальнейшем возможно определение проективного покрытия древесной растительности и преобладающих пород по данным BSFI при наличии набора данных для соответствующей калибровки.

В каждом регионе в зависимости от почвенно-климатических условий различается породный состав, конструкция и ширина ЗЛН. Поэтому необходимо проведение дальнейших работ по оценке точности выделения ЗЛН на основе BSFI и определение значений индекса, соответствующих лесопокрытой площади. Ограничивающим фактором для таких работ в настоящее время становится доступность точно выделенных границ полей и ЗЛН, по которым можно было бы проводить оценку точности. В качестве альтернативы векторным границам полей для оценки защищённости пашни могут выступать растровые маски пахотных земель разного пространственного разрешения, например GLC, ESRI и др. В регионах, где снежный покров неустойчив, выделение ЗЛН может быть основано на композитах минимальных значений NDVI, что требует проведения дополнительных исследований.

В зимнее время спектрально-отражательные характеристики снежного покрова и ЗЛН особенно сильно зависят от высоты Солнца и угла визирования. Регионы степной и лесостепной зоны, в которых создавались ЗЛН, находятся в средних широтах (примерно до 55° с.ш.), где съёмка КА Sentinel-2 осуществляется в 11:00–13:00 местного времени. Поэтому влияние высоты Солнца на спектрально-отражательные характеристики здесь минимально по сравнению с более высокими широтами. При использовании предложенного подхода в более северных регионах или данных с других КА необходимо учитывать факторы даты и времени спутниковой съёмки, от которых зависит высота Солнца (Барталев и др., 2022б).

Самая большая доля ложного детектирования участков ЗЛН вызвана их перепутыванием с высокой околородной растительностью (тростник, рогоз), кустарниками и высоким травостоем по днищам балок и оврагов. Решением этой проблемы может стать использование цифровых моделей рельефа, радарных или лидарных данных. По цифровой модели рельефа могут быть выделены водотоки и понижения, тогда как прилегающие к ним пиксели участков с наличием ДКР должны проходить дополнительную проверку. На основе радарных или лидарных данных возможно определение высоты деревьев (Барталев и др., 2022а; Чимитдоржиев и др., 2018) и фильтрация пикселей высокой травянистой растительности.

Требуются дальнейшие исследования для оценки эффективности применения BSFI для картографирования не только ЗЛН, но и других типов лесных насаждений по материалам различных сенсоров с более низким пространственным разрешением, в том числе для оценки проективного покрытия крон, выделения преобладающих пород и решения других задач дистанционного мониторинга лесов.

Заключение

В результате исследования предложен новый простой метод картографирования полезащитных и других лесных насаждений в малолесных регионах на основе минимальных значений NDVI за вегетационный сезон и альbedo снежного покрова в зимний период по данным Sentinel-2. На примере 15 районов Саратовской обл. показана эффективность данного подхода для картографирования защитных лесных насаждений, и в частности полезащитных лесных полос. Точность определения леса на основе предложенного индекса BSFI, по сравнению с результатами экспертного дешифрирования данных сверхвысокого разрешения, составила 91 %, а на прилегающих к сельскохозяйственным землям участках — 81 %.

Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8), а также по темам научно-исследовательских работ Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН № 122020100311-3, 122020100405-9 и 122020100406-6 с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. Агролесомелиорация. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с.
2. Аникеев Е. А., Мунтян А. Н., Захаров Д. С. Оценка обеспеченности территории Приднестровья полезащитными лесными полосами // Вестн. Приднестровского ун-та. Сер.: Медико-биологические и химические науки. 2018. № 2(59). С. 107–113.
3. Антонов С. А. Анализ пространственного положения защитных лесных насаждений на основе геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы международ. конф. М: Изд-во Московского ун-та, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 408–420. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420.
4. Барталев С. А., Исаев А. С., Лупян Е. А. Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сибирский эколог. журн. 2005. № 6. Т. 12. С. 1039–1054.
5. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
6. Барталев С. А., Богодухов М. А., Жарко В. О., Сидоренков В. М. (2022а). 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.
7. Барталев С. А., Ворушилов И. И., Егоров В. А. (2022б). Построение и радиометрическая нормализация безоблачных композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности для мониторинга лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 57–69. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.
8. Жарко В. О., Барталев С. А., Егоров В. А. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
9. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

10. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
11. Нарожняя А.Г., Чендев Ю.Г. Изучение современного экологического состояния лесных полос с использованием ГИС и ДДЗ // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы междунаро. конф. М: Изд-во Московского ун-та, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 54–65. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65.
12. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)» / под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. Т. 2. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. 476 с.
13. Проездов П.Н., Маштаков Д.А., Попов В.Г., Кузнецова Л.В., Карпушкин А.В., Самсонов Е.В., Панфилов А.В., Розанов А.В., Удалова О.Г., Вишнякова В.В., Берлин Н.Г., Пуговкина И.А., Хазова А.Г., Панфилова Е.Г., Иргискин И.Ю. Агролесомелиорация. Саратов: ООО «Амирит», 2016. 472 с.
14. Рулев А.С., Юферов В.Г., Анопин В.Н., Рулев Г.А. Геоинформационный анализ состояния придорожных лесных насаждений // Изв. Оренбургского гос. аграр. ун-та. 2014. № 3(47). С. 42–45.
15. Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. Оценка лесистости агроландшафтов юга приволжской возвышенности по данным NDVI // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее образование. 2016. № 4(44). С. 24–32.
16. Стратегия развития защитного лесоразведения в Волгоградской области на период до 2025 года. Волгоград: ФНИ агроэкологии РАН, 2017. 39 с.
17. Терехин Э.А. Распознавание залежных земель на основе сезонных значений вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 719–725. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-719-725.
18. Терехин Э.А. Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 142–156. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
19. Тимерьянов А.Ш. Влияние агролесомелиоративных насаждений на стоимость сельскохозяйственных угодий // Вестн. Башкирского гос. аграр. ун-та. 2010. № 3. С. 43–48.
20. Ткаченко Н.А., Кошелев А.В. Картографирование защитной лесистости агроландшафтов волгоградской Заволжья // Вестн. АПК Ставрополя. 2017. № 2(26). С. 137–143.
21. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашицкий А.В. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
22. Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Кирбижекова И.И., Шерхоева А.А., Балтухаев А.К., Дагуров П.Н. Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 9–24. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
23. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
24. Шихов А.Н., Дремин Д.А. Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 153–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168.
25. Begimova M. Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts // E3S Web Conf. 2021. V. 227. P. 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
26. Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map // Nature. 2014. V. 514(7523). P. 434. DOI: 10.1038/514434c.
27. Hall D., Riggs G., Salomonson V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 54. Iss. 2. P. 127–140.
28. Hansen M. C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.

29. *Isaev A. S., Bartalev S. A., Lupyan E. A., Lukina N. V.* Earth observations from satellites as a unique instrument to monitor Russia's forests // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2014. V. 84. No. 6. P. 413–419. DOI: 10.1134/S1019331614060094.
30. *Karra K., Kontgis C, Statman-Weil Z., Mazzariello J. C., Mathis M., Brumby S. P.*, 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.
31. *Klein A. G., Hall D. K., Riggs G. A.* Improving snowcover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model // *Hydrological Processes*. 1998. No. 12. P. 1723–1744.
32. *Koshelev A. V., Tkachenko N. A., Shatrovskaya M. O.* Decoding of forest belts using satellite images // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 875. Art. No. 012065. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
33. *Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V.* Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz // *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. V. 13. No. 7. P. 795–802. DOI: 10.1134/S1995425520070045.
34. *Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. 19 p. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
35. *Rulev A. S., Pugacheva A. M.* Formation of a New Agroforestry Paradigm // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. V. 89. No. 5. P. 495–501. DOI: 10.1134/S1019331619050071.
36. *Smirnov V. O., Zelentsova M. G., Krainyuk E. S.* Practical Application Peculiarities of Geo-Information Technologies While Planning the Protective Forest Belts // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 666. Art. No. 042005. 8 p. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042005.
37. *Vassilev K. V., Assenov A. I., Velev N. I., Grigorov B. G., Borissova B. B.* Distribution, Characteristics and Ecological Role of Protective Forest Belts in Silistra Municipality, Northeastern Bulgaria // *Ecologia Balcanica*. 2019. V. 11. Iss. 1. P. 191–204.
38. *Yu T., Liu P., Zhang Q., Ren Y., Yao J.* Detecting Forest Degradation in the Three-North Forest Shelterbelt in China from Multi-Scale Satellite Images // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 6. Art. No. 1131. 16 p. DOI: 10.3390/rs13061131.
39. *Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W., Souverijns N., Brockmann C., Quast R., Wevers J., Grosu A., Paccini A., Vergnaud S., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Georgieva I., Lesiv M., Carter S., Herold M., Li L., Tsendbazar N. E., Ramoino F., Arino O.* ESA WorldCover 10 m 2020 v100. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5571936.

Method for protective forest plantations mapping based on multi-temporal high spatial resolution satellite images and Bi-Season Forest Index

S. S. Shinkarenko^{1,2}, S. A. Bartalev¹, A. A. Vasilchenko²

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS
Volgograd 400062, Russia*

E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

Protective forest plantations (PFPs) are a very important component of the sustainable functioning of agricultural landscapes. They prevent the development of water and wind erosion. Over the recent decades, the rates of PFPs development in Russia have decreased many times over as compared to the middle of the last century. At the same time, due to natural and anthropogenic factors, the existing PFPs are subject to large-scale degradation processes, while there is a lack of information about their current state. Land cover type information products and forest monitoring systems cover only a part of the PFPs. Protective forest belts with a width of 10–20 m are reflected very fragmentarily on the existing global and national satellite maps of forests. The well-known approaches to the mapping of PFPs are based on expert interpretation of Earth remote sensing (ERS) data of ultra-high spatial resolution or ground-based surveys using GPS receivers. Such methods are time consuming and cannot be

applied over large areas. The paper proposes a new approach for mapping PFPs based on multi-season satellite ERS data using the BSFI (Bi-Season Forest Index). The index is calculated as the normalized difference between the minimum NDVI value for the vegetation period and the maximum albedo determined in winter when there is snow cover on the earth's surface. Pixels with positive values of this index can be attributed to the areas covered with tree vegetation. We have compared the PFP area with the results of expert interpretation of detailed satellite images and widely used information products of satellite land cover mapping. The PFP area was identified on the basis of the BSFI using satellite imagery data obtained by the Sentinel-2 toolbox. The comparative analysis showed a close connection between the results obtained using the Sentinel-2 data and the estimates of the PFP area based on expert interpretation of detailed satellite images. The connection was characterized by a correlation coefficient $R = 0.99$. The analysis also allowed establishing the value of accuracy of forest identification based on this index at the level of 91 %. The relative error in identifying field-protective forest belts in the 50 m zone around the field boundaries was 9 %. The proposed approach is recommended for mapping PFPs in sparsely forested regions, where it is possible to obtain satellite images of the earth's surface with snow cover.

Keywords: shelterbelt, tree and shrub vegetation, agrolandscapes, agroforestry, remote sensing, Sentinel-2, NDVI

Accepted: 16.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222

References

1. *Agrolesomeliatsiya* (Agroforestry), Volgograd: VNIALMI, 2006, 746 p. (in Russian).
2. Anikeev E. A., Muntean A. N., Zakharov D. S., Assessment of provision of Pridnestrovian territory by field-protective forest strips, *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Ser.: Mediko-biologicheskie i khimicheskie nauki*, 2018, No. 2(59), pp. 107–113 (in Russian).
3. Antonov S. A., Spatial analysis of protective forest plantations based on geographic information technologies and remote sensing data, *InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territorii* (InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories), Proc. Intern. Conf., Moscow: Moscow University Press, 2020, Vol. 26, Part 2, pp. 408–420 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420.
4. Bartalev S. A., Isaev A. S., Loupian E. A., Modern Priorities of Development of Monitoring of Boreal Ecosystems by the Data of Spacecraft Observations, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 6, pp. 1039–1054 (in Russian).
5. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
6. Bartalev S. A., Bogodukhov M. A., Zharko V. O., Sidorenkov V. M. (2022a), Investigation of the possibilities of using ICESat-2 data to estimate the height of forests in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 195–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
7. Bartalev S. A., Vorushilov I. I., Egorov V. A. (2022b), Creation and radiometric normalisation of cloud-free composite satellite images of snow-covered terrestrial surface for forest monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 57–69 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.
8. Zharko V. O., Bartalev S. A., Egorov V. A., Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
9. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
10. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.

11. Narozhnyaya A. G., Chendev Yu. G., The study of the modern ecological state of shelterbelts using GIS and remote sensing data, *InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoichivogo razvitiya territorii* (InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories), Proc. Intern. Conf., Moscow: Moscow University Press, 2020, Vol. 26, Part 2, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65.
12. *National report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructure, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)”*, Vol. 2, Moscow: OOO “Izdatel’stvo MBA”, 2019, 476 p. (in Russian).
13. Proezdov P. N., Mashtakov D. A., Popov V. G., Kuznetsova L. V., Karpushkin A. V., Samsonov E. V., Panfilov A. V., Rozanov A. V., Udalova O. G., Vishnyakova V. V., Berlin N. G., Pugovkina I. A., Khazova A. G., Panfilova E. G., Irgiskin I. Yu., *Agroforestry*, Saratov: OOO “Amirit”, 2016, 472 p. (in Russian).
14. Rulev A. S., Yuferev V. G., Anopin V. N., Rulev G. A., Geoinformation analysis of the state of roadside forest plantations, *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No. 3(47), pp. 42–45 (in Russian).
15. Rulev A. S., Kosheleva O. Yu., Shinkarenko S. S., Assessment of woodiness in agrolandscapes of the Southern Volga upland according to NDVI, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie*, 2016, No. 4(44), pp. 24–32 (in Russian).
16. *Strategy for the development of protective afforestation in the Volgograd region for the period up to 2025*, Volgograd: FSC of agroecology RAS, 2017, 39 p. (in Russian).
17. Terekhin E. A., Recognition of abandoned agricultural lands using seasonal NDVI values, *Computer Optics*, 2017, Vol. 41, No. 5, pp. 719–725 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-719-725.
18. Terekhin E. A., Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 142–156 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
19. Timer’yanov A., Influence of agroforest stands on cost agricultural grounds, *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, No. 3, pp. 43–48 (in Russian).
20. Tkachenko N. A., Koshelev A. V., Mapping of aprotective woodiness of agrolandscapes of Volgograd Zavolzhye, *Vestnik APK Stavropol’ya*, 2017, No. 2(26), pp. 137–143 (in Russian).
21. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. V., Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
22. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I., Sherkhoeva A. A., Baltukhaev A. K., Dagurov P. N., Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 9–24 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
23. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes according to MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 179–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
24. Shikhov A. N., Dremine D. A., Patterns of wind-induced forest damage in the European Russia and Ural: analysis with satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 153–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168.
25. Begimova M., Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 227, p. 02004, DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
26. Chen J., Ban Y., Li S., China: Open access to Earth land-cover map, *Nature*, 2014, Vol. 514(7523), p. 434, DOI: 10.1038/514434c.
27. Hall D., Riggs G., Salomonson V., Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sensing of Environment*, 1995, Vol. 54, Issue 2, pp. 127–140.
28. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
29. Isaev A. S., Bartalev S. A., Lupyan E. A., Lukina N. V., Earth observations from satellites as a unique instrument to monitor Russia’s forests, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, Vol. 84, No. 6, pp. 413–419, DOI: 10.1134/S1019331614060094.
30. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J. C., Mathis M., Brumby S. P., 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.

31. Klein A. G., Hall D. K., Riggs G. A., Improving snowcover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model, *Hydrological Processes*, 1998, No. 12, pp. 1723–1744.
32. Koshelev A. V., Tkachenko N. A., Shatrovskaya M. O., Decoding of forest belts using satellite images, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 875, Art. No. 012065, 9 p., DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
33. Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 795–802, DOI: 10.1134/S1995425520070045.
34. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, 19 p., <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
35. Rulev A. S., Pugacheva A. M., Formation of a New Agroforestry Paradigm, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, Vol. 89, No. 5, pp. 495–501, DOI: 10.1134/S1019331619050071.
36. Smirnov V. O., Zelentsova M. G., Krainyuk E. S., Practical Application Peculiarities of Geo-Information Technologies While Planning the Protective Forest Belts, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 666, Art. No. 042005, 8 p., DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042005.
37. Vassilev K. V., Assenov A. I., Velev N. I., Grigorov B. G., Borissova B. B., Distribution, Characteristics and Ecological Role of Protective Forest Belts in Silistra Municipality, Northeastern Bulgaria, *Ecologia Balcanica*, 2019, Vol. 11, Issue 1, pp. 191–204.
38. Yu T., Liu P., Zhang Q., Ren Y., Yao J., Detecting Forest Degradation in the Three-North Forest Shelterbelt in China from Multi-Scale Satellite Images, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 6, Art. No. 1131, 16 p., DOI: 10.3390/rs13061131.
39. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W., Souverijns N., Brockmann C., Quast R., Wevers J., Grosu A., Paccini A., Vergnaud S., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Georgieva I., Lesiv M., Carter S., Herold M., Li L., Tsendbazar N. E., Ramoino F., Arino O., *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*, 2021, DOI: 10.5281/zenodo.5571936.