

Применение спутниковых индексов леса и глобальных данных о типах земного покрова при картографировании полевых насаждений на региональном уровне

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев, А. В. Кашницкий

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

Актуальность оценки состояния и площади полевых лесных полос (ПЗЛП) в России обусловлена их деградацией и отсутствием единой системы учёта. Цель работы состоит в определении оптимальных методов картографирования ПЗЛП на региональном уровне на основе спутниковых данных Sentinel-2. Исследование проведено на примере Волгоградской области, характеризующейся разнообразием почвенно-климатических условий. В работе сравнивались результаты картографирования древесно-кустарниковой растительности (ДКР) по бисезонному индексу леса BSFI (*англ.* Bi-Seasonal Forest Index), лесному индексу FI (*англ.* Forest Index) и семи глобальным продуктам земного покрова (ESA (*англ.* European Space Agency) WorldCover, ESRI (*англ.* Environmental Systems Research Institute) LandCover, FROM-GLC10 (*англ.* Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover), Dynamic World, GLC_FCS10 (*англ.* Global 10 m Land-Cover dataset with Fine Classification System), Copernicus LCFM (*англ.* Global Land Cover and Tropical Forest Mapping and Monitoring service) и JRC_GFC2020 (*англ.* Joint Research Centre Global map of Forest Cover)). Валидация индексов по данным аэрофотосъёмки показала, что BSFI точнее аппроксимирует сомкнутость полога с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,80$ по сравнению с FI ($R^2 = 0,73$). Для идентификации именно ПЗЛП построены 50-метровые буферные зоны вокруг сельскохозяйственных полей, что позволило минимизировать ошибки перепутывания древесно-кустарниковой и высокопродуктивной травянистой растительности. Установлено, что глобальные продукты земного покрова систематически занижают защитную лесистость пашни (0,7–1,5 %) по сравнению с официальной статистикой (2,2 %). Наилучшее согласие со статистическими данными показал бисезонный индекс леса BSFI (лесистость пашни 2,2 %), что объясняется его способностью детектировать угнетённые насаждения в аридных условиях за счёт использования зимних спутниковых изображений со снежным покровом. Предложен гибридный подход на основе комбинирования карт ESA и Copernicus для повышения полноты при создании опорной выборки для классификации спутниковых данных ДЗЗ по маске ДКР на основе индексов леса, для чего требуется продолжение исследований. Полученные результаты могут служить основой для проведения оценки площади ПЗЛП и защитной лесистости пашни на региональном и национальном уровне.

Ключевые слова: защитное лесоразведение, дистанционное зондирование, картографирование, Волгоградская область, древесно-кустарниковая растительность, агролесомелиорация

Одобрена к печати: 16.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-242-257

Введение

Защитные лесные насаждения (ЗЛН), включая полевые лесные полосы (ПЗЛП), играют важную роль в снижении интенсивности процессов дефляции и водной эрозии почвенного покрова, способствуют сохранению плодородия, созданию благоприятных микроклиматических условий в агроландшафтах и повышению урожайности сельскохозяйственных культур (Дубенок и др., 2016; Силова, 2021; Pugacheva, 2023, Yang et al., 2021). Большая часть существующих ЗЛН создавалась 30–50 лет назад и ранее, поэтому на значительной площади они достигли предельного возраста. Вследствие отсутствия ухода, негативного воздействия пожаров, вредителей, засух и нелегальных рубок многие ЗЛН находятся в неудовлетворительном состоянии. За всю историю учёта с 1787 г. на землях сельскохозяйственного назначения в России было создано 5,2 млн га ЗЛН (Национальный..., 2019). В настоящее время в Российской Федерации площадь ЗЛН по экспертным оценкам составляет при-

мерно 2,6 млн га, в том числе 1,15 млн га относятся к ПЗЛП (Kulik et al., 2015), что значительно меньше научно обоснованных норм облесения сельскохозяйственных земель, так как необходимо чтобы площадь ПЗЛП занимала не менее 1,5–3 % площади пашни (Кулик и др., 2018). По оценкам К. Н. Кулика с соавторами (Kulik et al., 2015) для системного лесомелиоративного обустройства сельскохозяйственных земель страны требуется создание примерно 4,4 млн га ЗЛН, в том числе 1,3 млн га ПЗЛП. При этом точные данные о площади, возрастном распределении и состоянии существующих ЗЛН в масштабе страны отсутствуют (Национальный..., 2019), поэтому необходимо проведение оценки площади существующих ЗЛН, в том числе ПЗЛП, для определения потребности в новых насаждениях, а также выявления территорий, где в настоящее время защитная лесистость сельскохозяйственных земель меньше рекомендованных величин (Рулев и др., 2016).

Оценка площади и наличия ПЗЛП в масштабах страны и её регионов практически невозможна без использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса (Барталев и др., 2016), поэтому задача определения оптимальных подходов к картографированию ЗЛН достаточно актуальна. Полезащитные лесные полосы имеют относительно небольшую ширину, до 10–20 м, что диктует соответствующие требования к пространственному разрешению применяемых данных ДЗЗ (Шинкаренко и др., 2022). Достаточно широко при картографировании ПЗЛП используются данные ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения, в том числе из открытых источников. При этом применяются как трудоёмкие методы экспертного дешифрирования (Антонов, 2020; Нарожняя, Чендев, 2020; Begimova, 2021; Koshelev et al., 2021), так и методы классификации изображений (Терехов и др., 2014). Значительная трудоёмкость ручного картографирования и высокая стоимость коммерческих спутниковых данных ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения затрудняют их использование в масштабах не только страны, но и регионов. Поэтому оптимальными источниками данных ДЗЗ для этой цели представляются спутниковые изображения Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м и разработанные на их основе индексы леса и информационные продукты типов земного покрова. Например, бисезонный индекс леса BSFI (*англ.* Bi-Seasonal Forest Index), рассчитываемый по летним значениям NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и коэффициентам спектральной яркости (КСЯ) земной поверхности с наличием снега, в Саратовской области продемонстрировал наибольшую точность при картографировании ПЗЛП по сравнению с большинством существующих данных о земном покрове сопоставимого пространственного разрешения (Шинкаренко и др., 2022). Лесной индекс FI (*англ.* Forest Index) специально разработан для картографирования лесов (Ye et al., 2014), при этом не требует зимних спутниковых изображений, что в южных регионах является существенным преимуществом. Многочисленные глобальные спутниковые информационные продукты о типах земного покрова снимают необходимость обработки значительных объёмов спутниковой информации, но в то же время имеют ограниченный временной охват и зачастую характеризуются пропусками ПЗЛП (Васильченко, Выприцкий, 2023; Шинкаренко и др., 2022). Преимущество индексов леса также состоит в возможности получения данных о площади ЗЛН с необходимой регулярностью, а также самостоятельной настройки пороговых значений при сегментации, построении выборок и масок для алгоритмов классификации, что позволяет существенно повысить точность получаемых региональных оценок площади ЗЛН.

Цель исследований заключается в определении оптимальных методов картографирования полезащитных лесных полос и определении защитной лесистости пахотных земель на региональном уровне на основе спутниковых данных Sentinel-2 и разработанных на их основе индексов леса и информационных продуктов типов земного покрова.

Объект, материалы и методы исследования

Объект исследований

В качестве тестового региона для проведения исследований выбрана Волгоградская область, которая характеризуется достаточно широким диапазоном почвенно-климатических

условий, определяющих современное состояние ЗЛН (Выприцкий, Шинкаренко, 2022). С северо-запада на юго-восток почвы здесь сменяются с обыкновенных чернозёмов на светло-каштановые и солонцы, широко распространены всесторонние сочетания солонцов, каштановых и светло-каштановых почв. Норма осадков изменяется от 420 мм по метеостанции Урюпинск на северо-западе региона до 260 мм по метеостанции Эльтон на востоке при среднегодовой температуре около 7,6 и 9,1 °С соответственно. В соответствии с широтно-зональными особенностями региона с северо-запада на юго-восток снижается и лесистость территории (Pugacheva, 2023).

А. М. Пугачева (Pugacheva, 2023) со ссылкой на Комитет природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области приводит оценку площади защитных лесных насаждений в Волгоградской области в 69,5 тыс. га (в том числе 62,5 тыс. га полезащитных насаждений) по данным инвентаризации 2015 г., проводившейся на землях в региональной собственности. Согласно предоставленной Министерством сельского хозяйства РФ информации о мелиоративных ЗЛН, в отношении которых осуществлён учёт в соответствии со статьёй 20.1 Федерального закона от 10 января 1996 г. № 4-ФЗ «О мелиорации земель», в Волгоградской области зафиксировано более 28 тыс. ЗЛН общей площадью 91,1 тыс. га. Ещё 43,3 тыс. га занято «колхозными лесами», установленными по результатам реализации мероприятий по созданию карт-схем земель сельскохозяйственного назначения, включая сельскохозяйственные угодья, в рамках Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса РФ, утверждённой постановлением Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 731. Таким образом, площадь покрытых лесом земель сельскохозяйственного назначения по официальным данным в регионе составляет 134,4 тыс. га. Эта величина достаточно хорошо согласуется с площадью древесно-кустарниковой растительности (ДКР) защитного значения за пределами земель Государственного лесного фонда на 2006 г. (130,7 тыс. га) по сведениям из Национального атласа почв Российской Федерации (Национальный..., 2011; далее — «Атлас почв РФ»). Ещё около 21 тыс. га ДКР в окрестностях сельскохозяйственных полей относятся к государственным защитным лесным полосам, которые состоят из 3–4 параллельных лент шириной 60 м на расстоянии 300 м друг от друга или одной ленты шириной 100 м (Выприцкий, Шинкаренко, 2022; Чеплянский и др., 2022) и расположены на лесных землях. Таким образом, площадь ПЗЛП и прилегающей к пашне ДКР на сельскохозяйственных и лесных землях региона составляет примерно 110 тыс. га без учёта естественной ДКР. Площадь используемой пашни в регионе оценивается примерно в 5 млн га (Синельникова и др., 2023), соответственно средняя защитная лесистость пашни составляет 2,2 %. Согласно Лесному плану Волгоградской области на 2019–2028 гг. (<http://www.publication.pravo.gov.ru/document/3400202504020002>) в 2018 г. площадь лесных земель в регионе составляет 680 тыс. га, из которых лесом покрыто только 460,7 тыс. га или 4,1 % площади данного субъекта РФ. Таким образом, общая лесопокрытая площадь по официальным статистическим данным составляет 5,2 % территории региона. В эту величину не входит ДКР на землях населённых пунктов и сады, поэтому по данным ДЗЗ покрытая древесной растительностью площадь должна быть больше, чем по данным статистики.

Источники данных и методы их обработки

Расчёт индексов леса проводился на основе ежемесячных композитных спутниковых изображений Sentinel-2 с устранённым влиянием облачного покрова (Кашницкий и др., 2022) с использованием сервиса «Bea-Science» (Loupian et al., 2022) и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Лесной индекс FI определяется по формуле (Ye et al., 2014):

$$FI = ((NIR - Red - L)/(NIR + Red))((C_1 - NIR)/(C_2 + Green)),$$

где NIR (англ. near infrared), Red, Green — КСЯ в ближнем инфракрасном (ИК), красном и зелёном диапазонах спектра; L, C₁, C₂ — константы, L = 0,01, C₁ = 1, C₂ = 0,1.

Для вычисления бисезонного индекса леса BSFI требуется минимизированное значение NDVI за июнь – август, а также максимальное значение КСЯ в красном диапазоне в зимний период при наличии на земной поверхности снежного покрова:

$$BSFI = (NDVI_{\min} - Red_{\max}) / (NDVI_{\min} + Red_{\max}), \text{ при } NDVI_{\min} > 0,$$

где $NDVI_{\min}$ — минимизированное за июнь – август значение NDVI; $Red_{\max}$ — максимальное значение КСЯ в красном диапазоне спектра в период наличия на земной поверхности снежного покрова.

Древесно-кустарниковая растительность выделялась на основе пороговой дихотомии по значениям FI и BSFI. Этот подход позволяет обойтись без создания обучающей выборки для алгоритмов классификации. Величины порогов подбирались на основе данных аэро-съемки 2022 г., описание и результаты которой были ранее опубликованы (Шинкаренко, Барталев, 2023). Для FI считалось медианное значение за летние месяцы. Взаимосвязи сомкнутости полога в пикселях спутникового изображения с индексами леса аппроксимируются S-образной функцией со среднеквадратической ошибкой (СКО) 17,9 % и коэффициентом детерминации $R^2 = 0,80$ для BSFI и СКО = 21,0 % и $R^2 = 0,73$ для FI. К занятым ДКР территориям относились пиксели, площадь которых покрыта ДКР не менее, чем на 50 %: $BSFI > 0$, $FI > 2,76$ (рис. 1).

В работе также применялись глобальные информационные продукты типов земного покрова ESA (англ. European Space Agency) WorldCover на 2021 г. (Zanaga et al., 2021), ESRI (англ. Environmental Systems Research Institute) LandCover на 2022 г. (Karra et al., 2021), FROM-GLC10 (англ. Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover) на 2017 г. (Gong et al., 2019), DW (англ. Dynamic World) на 2022 г. (Brown et al., 2022), GLC_FCS10 (англ. Global 10 m Land-Cover dataset with Fine Classification System) на 2023 г. (Zhang et al., 2025), Copernicus LCFM (англ. Global Land Cover and Tropical Forest Mapping and Monitoring service) на 2020 г. (Land..., 2025) и JRC_GFC2020 (англ. Joint Research Centre Global map of Forest Cover) на 2020 г. (Bourgoin et al., 2026).

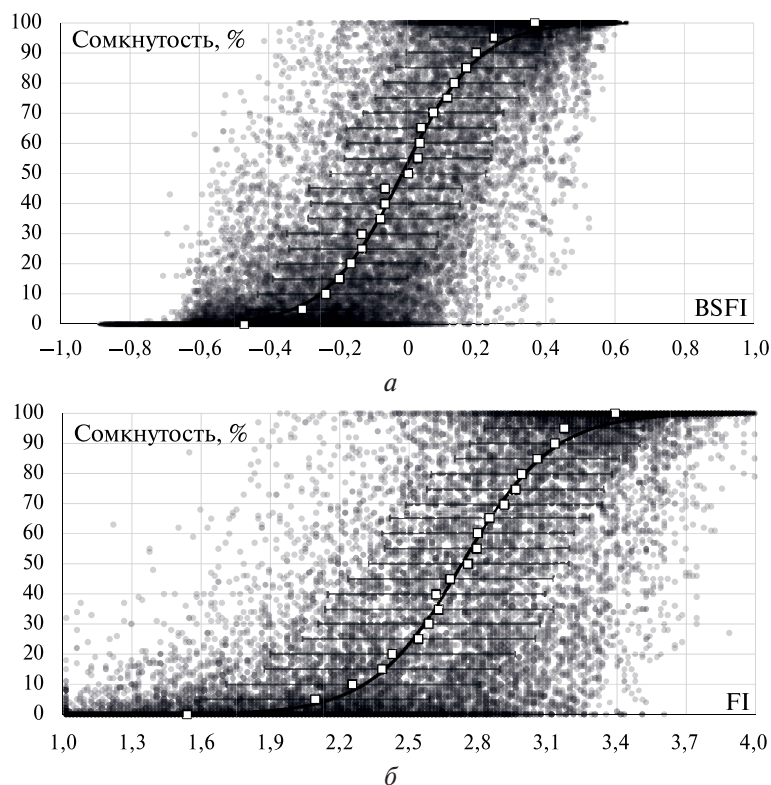


Рис. 1. Сопоставление значений лесных индексов BSFI (а) и FI (б) в пикселях Sentinel-2 и сомкнутости по данным аэрофотосъемки (планками показано стандартное отклонение средних значений лесных индексов)

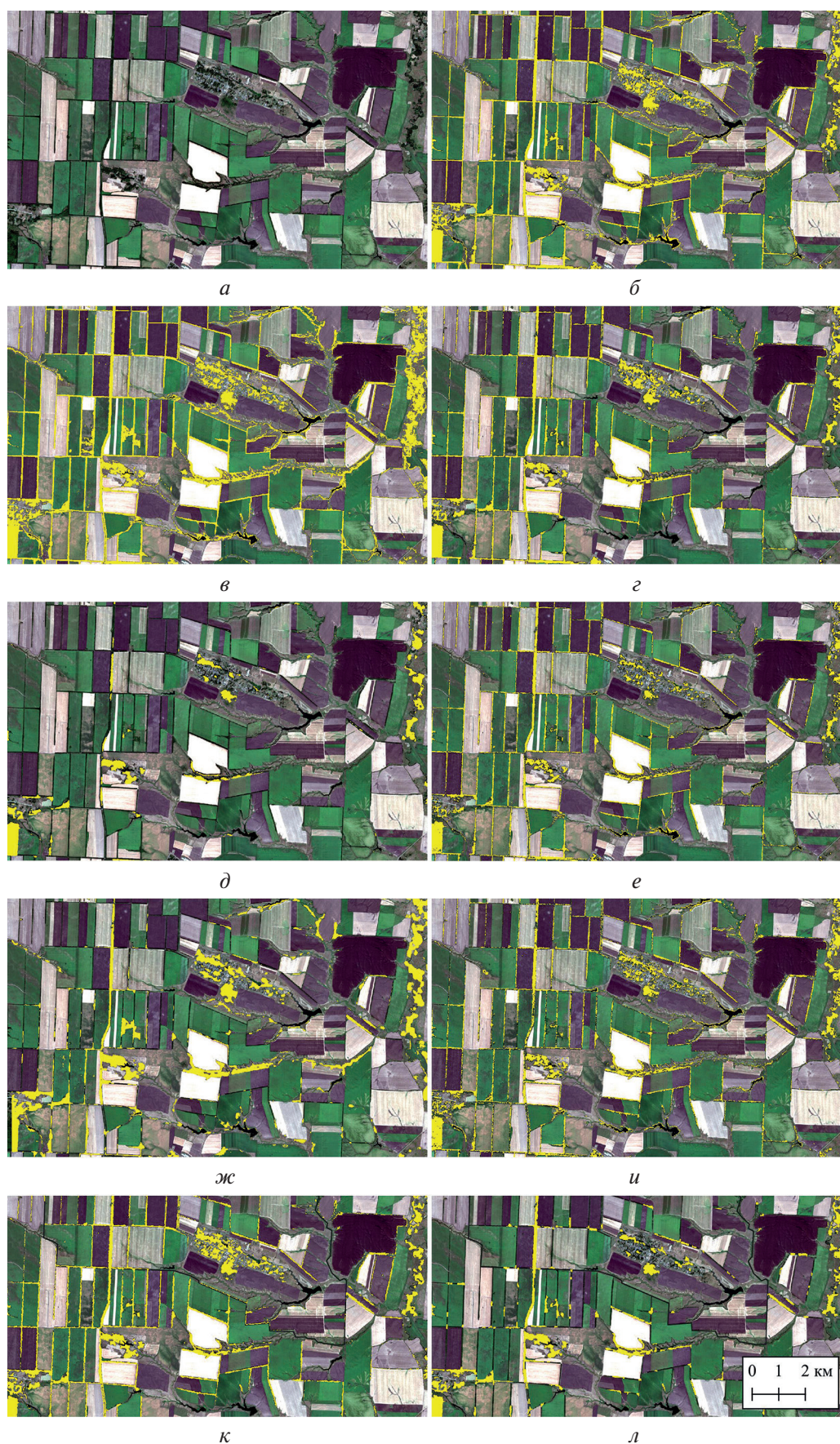


Рис. 2. Спутниковое изображение Sentinel-2 за 23 августа 2022 г. (а) и примеры выделения ДКР на основе BSFI (б), FI (в), ESA WorldCover (г), ESRI LandCover (д), FROM-GLC10 (е), DW (ж), GLC_FCS10 (и), Copernicus LCFM (к) и JRC_GFC2020 (л)

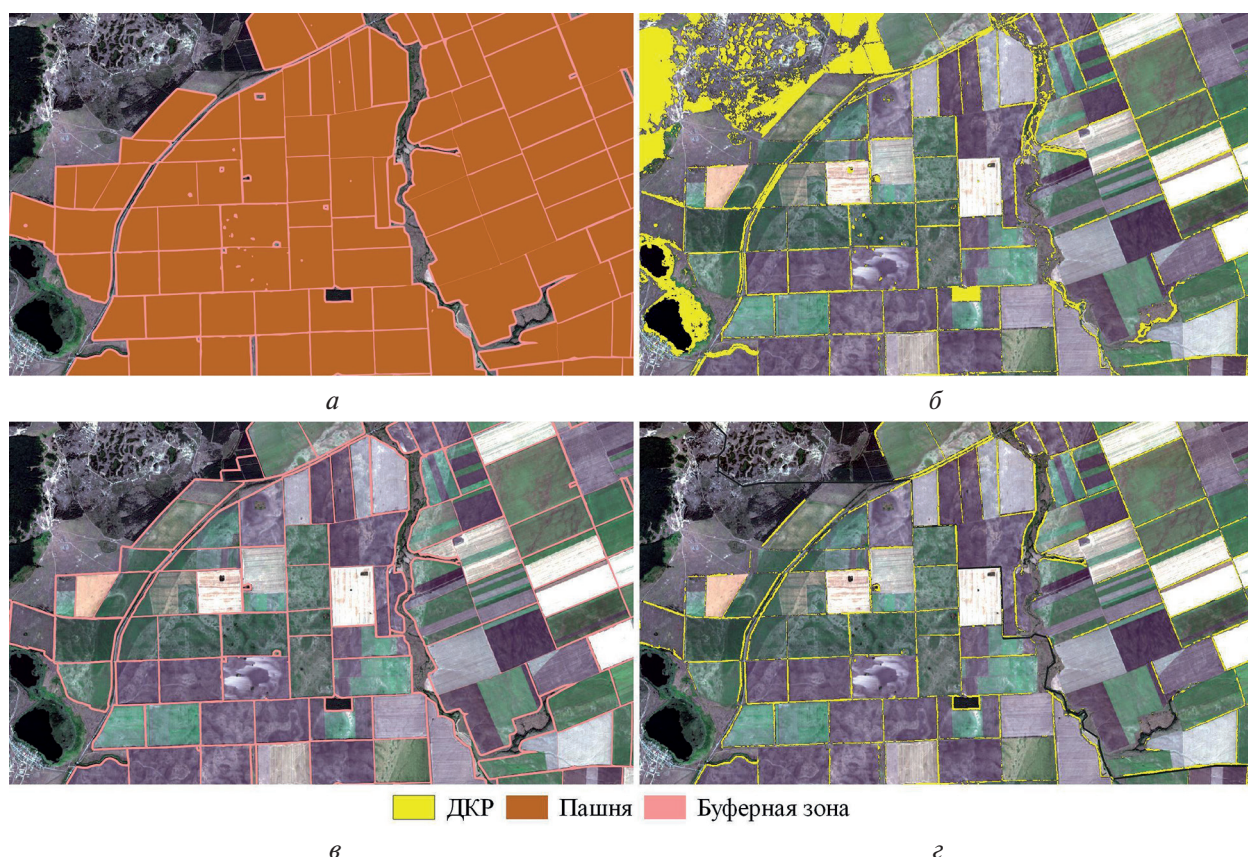


Рис. 3. Пример идентификации ДКР в окрестностях сельскохозяйственных полей: *а* — границы полей и буферная зона 50 м; *б* — маска древесно-кустарниковой растительности на основе BSFI; *в* — 50-метровая буферная зона вокруг полей; *г* — ДКР в 50-метровой буферной зоне вокруг пашни

Данные DW, поскольку они предоставляются не для ежегодного интервала, а для каждой сцены, были приведены к ежегодным срезам путём расчёта медианного значения за период (Кашницкий, Лупян, 2025). Результаты картографирования ДКР по индексам леса на 2022 г. и спутниковым информационным продуктам типов земного покрова показаны на *рис. 2*.

Полезашитные лесные полосы и другая ДКР, непосредственно примыкающие к сельскохозяйственным полям, идентифицировались с использованием буферной зоны 50 м в их окрестности. Границы полей получены с использованием сервиса «Beta-Science» и уточнены согласно данным К. П. Синельниковой с соавторами (2023). Схема идентификации ПЗЛП показана на *рис. 3*: на первом этапе строится буферная зона вокруг сельскохозяйственных полей, далее из неё удаляются соответствующие сельскохозяйственным угодьям пиксели, после чего выделяется ДКР в буферной зоне вокруг полей.

Результаты и обсуждение

Результаты сопоставления оценок по площади ДКР в Волгоградской области на уровне районов и лесничеств представлены на *рис. 4* и в *таблице*. Следует учитывать, что Лесной план региона включает исключительно лесопокрытую площадь на землях государственного лесного фонда, т.е. не отражает ЗЛН на землях сельскохозяйственного назначения. Данные из Атласа почв РФ включают и площади ДКР за пределами лесного фонда, но не учитывают сады и насаждения на землях населённых пунктов. Поэтому ни один из официальных источников информации о площади ДКР не охватывает все её варианты, соответственно оценки площади ДКР по данным ДЗЗ должны быть выше, чем по статистике. На основе анализа информационного продукта Global Forest Change (Hansen et al., 2013) установлено, что убыль площади лесов в период 2000–2020 гг. составила 11,5 тыс. га, а прирост — 5,6 тыс. га, что не оказывает существенного влияния при сравнении оценок по ДЗЗ и данным статистики.

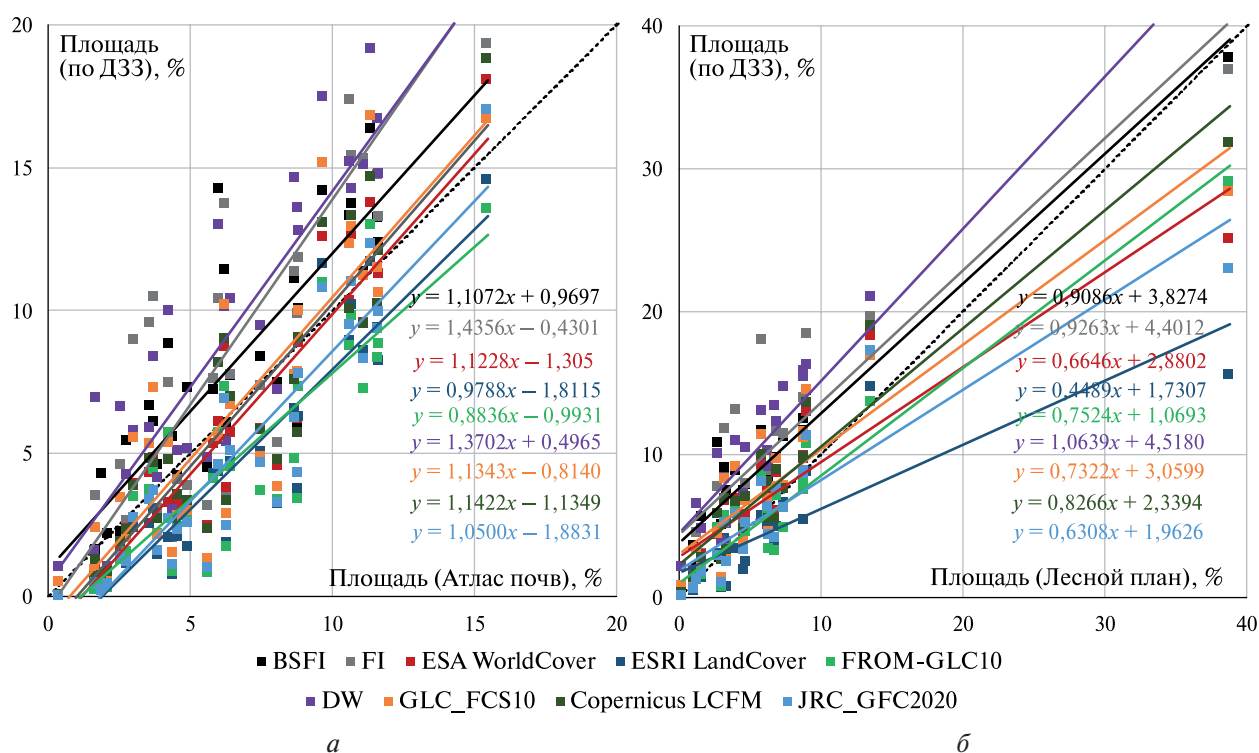


Рис. 4. Сопоставление площади древесно-кустарниковой растительности по данным BSFI, FI, ESA WorldCover, ESRI LandCover, FROM-GLC10, DW, GLC_FCS10, Copernicus LCFM, JRC_GFC2020 с Атласом почв РФ на уровне муниципальных районов (а) и с Лесным планом на уровне лесничеств (б) Волгоградской области

Метрики точности при оценке лесистости на основе данных ДЗЗ,
Атласа почв РФ на уровне районов и Лесного плана на уровне лесничеств

Источник	Год	Атлас почв РФ		Лесной план		Лесистость общая, %	Лесистость пашни, %
		R	СКО, %	R	СКО, %		
BSFI	2022	0,88	2,8	0,96	3,9	7,2	2,2
FI	2022	0,83	4,5	0,89	5,3	7,6	2,4
ESA WorldCover	2021	0,94	1,7	0,91	3,5	5,3	1,3
ESRI LandCover	2022	0,92	2,5	0,83	5,2	4,3	0,7
FROM-GLC10	2017	0,87	2,6	0,96	2,6	4,1	0,9
DW	2022	0,91	3,9	0,97	5,4	8,3	1,5
GLS-FCS10	2023	0,87	2,4	0,91	3,5	5,7	1,5
Copernicus LCFM	2020	0,92	1,9	0,95	2,8	5,6	1,5
JRC_GFC2020	2020	0,93	2,2	0,90	3,7	4,3	0,8

Примечание: R – коэффициент корреляции.

Наиболее близкие оценки по общей лесистости к официальным статистическим данным (5,2 %) получены на основе информационных продуктов ESA WorldCover (5,3 %), Copernicus LCFM (5,6 %) и GLS-FCS10 (5,7 %). Спутниковые индексы леса и данные DW существенно завышают лесистость относительно статистических данных (см. рис. 4, таблицу), что свидетельствует как о недоучёте статистикой ДКР, так и о ложных определениях леса по спутниковой информации. Визуальная оценка карт ДКР указывает на очень сильный недоучёт ПЗЛП

по данным ESRI LandCover, FROM-GLC10 и JRC_GFC2020. Данные DW и GLC-FCS10 имеют как значительное количество пропусков при идентификации ПЗЛП, так и высокую долю ложных определений леса. Информационные продукты ESA WorldCover и Copernicus LCFM практически не содержат ошибок первого рода при идентификации ДКР, но каждый из них характеризуется существенными пропусками ПЗЛП. На основе этих двух информационных продуктов возможно создание синтетической карты, которая включала бы объединённую площадь ДКР по данным каждого из них. При низкой доле ошибок ложного определения ДКР это позволит увеличить полноту идентификации ПЗЛП: на основе объединённых карт ESA WorldCover и Copernicus LCFM защитная лесистость пашни составила 1,7 %.

Согласно Атласу почв РФ площадь ДКР защитного значения за пределами земель лесного фонда равна 2,2 % площади пашни. По данным Министерства сельского хозяйства РФ площадь ПЗЛП составляет 1,8 % пашни на 2006 г. Если добавить к ней государственные защитные лесные полосы, которые расположены на землях лесного фонда, но примыкают к сельскохозяйственным угодьям, то полученная величина защитной лесистости пашни на 2022 г. достигнет 2,1 %. По данным всех спутниковых информационных продуктов типов земного покрова лесистость пашни значительно ниже (0,7–1,5 %), чем оценка по данным официальной статистики, индексам леса FI (2,4 %) и BSFI (2,2 %).

Индексы леса характеризуются ложными определениями ДКР, которые связаны с высокопродуктивной травянистой растительностью. Так, и FI, и BSFI регулярно относят к ДКР высокостебельную околородную растительность, FI также детектирует часть сельскохозяйственных посевов как ДКР. Сравнение оценок площади леса по данным BSFI с результатами экспертного дешифрирования в Волгоградской области продемонстрировало общую точность BSFI на уровне 98 % с полнотой 97 % и точностью пользователя 83 % (Васильченко, Выприцкий, 2023). Ограничение области картографирования ПЗЛП буферной зоной вокруг сельскохозяйственных полей и их исключение позволяют снизить долю ошибочных определений ДКР, связанных с околородной или культурной нелесной растительностью. Вследствие этого оценки площади ПЗЛП по данным индексов леса наиболее близки к величинам согласно официальной статистике. Необходимо отметить, что статистические данные о ЗЛН не считаются полными, поскольку могли устареть, в случае с информацией из Атласа почв РФ, а также не охватывают искусственную и естественную ДКР на прилегающих к сельскохозяйственным полям землях других категорий.

По экспертным оценкам оптимальная защитная лесистость пашни должна быть не меньше 1,5–3 % на пологих склонах и достигать 5–8 % на слабонаклонных (Кулик и др., 2018). По статистическим данным и оценкам на основе индексов леса величина средней защитной лесистости пашни в регионе (2,2 %) соответствует рекомендуемой величине. Тем не менее защищённость пахотных угодий ЗЛН очень неравномерна. На рис. 5 показаны результаты оценки защитной лесистости пашни в административных районах Волгоградской области. Все информационные продукты и FI демонстрируют практически полное отсутствие ПЗЛП в южных районах области, в то время как по статистическим данным и согласно BSFI защитная лесистость пашни здесь составляет 1–1,5 %. Это может быть связано с неудовлетворительным состоянием ЗЛН в достаточно неблагоприятных гидротермических условиях, вследствие чего ДКР характеризуется низкой зелёной фитомассой листьев и хуже детектируется на основе данных вегетационного периода. Индекс BSFI использует не только летние значения вегетационного индекса, но и зимние спутниковые данные ДЗЗ при наличии снежного покрова. Это позволяет более полно идентифицировать ДКР в угнетённом состоянии, что достаточно важно, поскольку даже в неудовлетворительном состоянии ПЗЛП выполняют часть своих мелиоративных функций (Дубенок и др., 2016). Одним из способов снижения доли ложных определений по данным индексов леса может быть использование данных коротковолнового ИК-диапазона, который чувствителен как к характеристикам ДКР (Терехин, 2022), так и к влажности, что позволяет снизить влияние околородной растительности (Васильченко, Выприцкий, 2023). Минусом данных коротковолнового ИК-диапазона Sentinel-2 является более низкое пространственное разрешение, что критически важно при картографировании ПЗЛП.

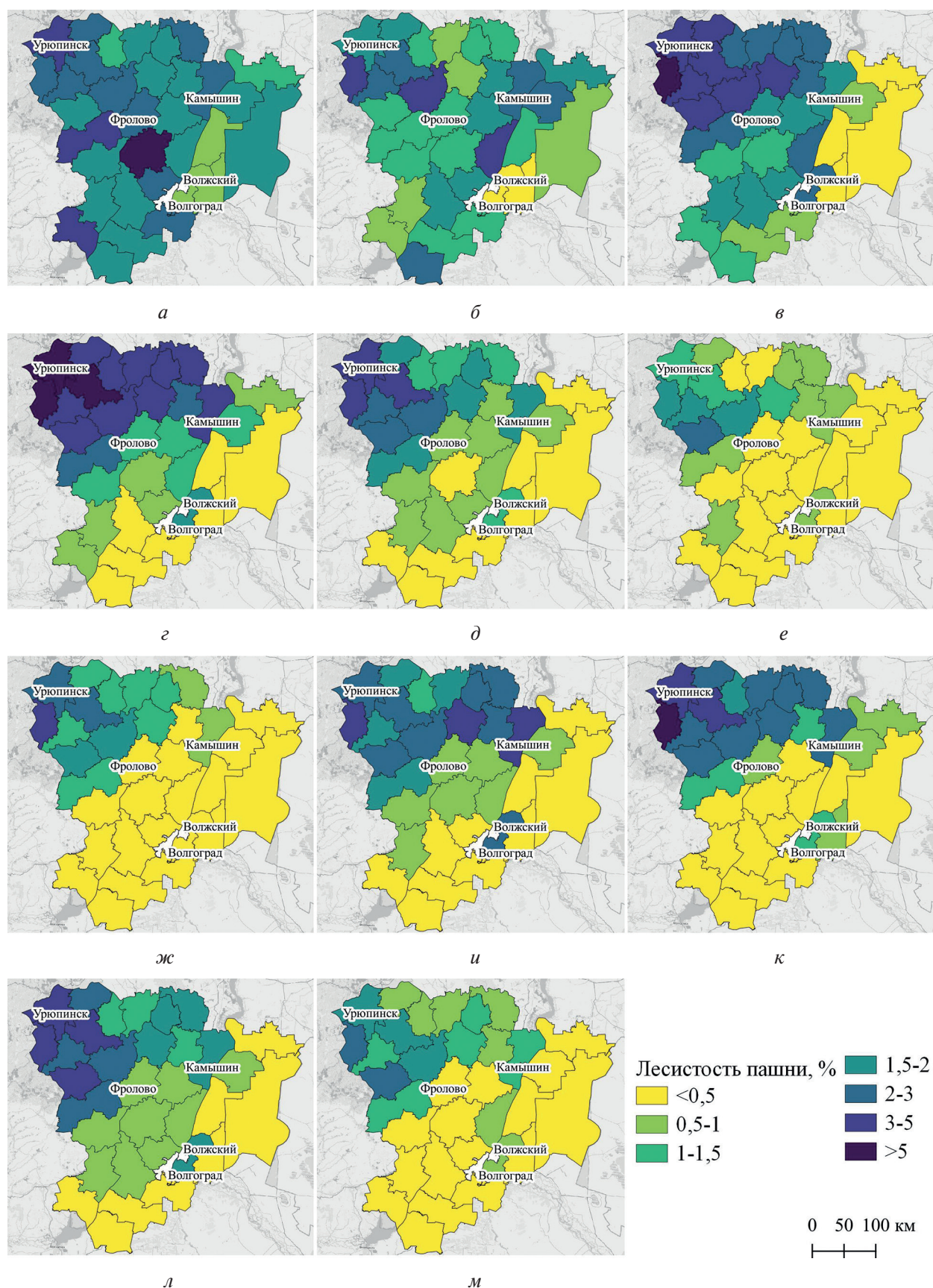


Рис. 5. Лесистость пашни по данным Атласа почв РФ (а), Министерства сельского хозяйства РФ (б), BSFI (в), FI (г), ESA WorldCover (д), ESRI LandCover (е), FROM-GLC10 (ж), DW (и), GLC_FCS10 (к), Copernicus LCFM (л) и JRC_GFC2020 (м)

При наличии границ отдельных сельскохозяйственных полей возможен расчёт их облесённости как отношения площади ДКР в окрестности к площади самого поля (рис. 6), что даёт представление не только о защищённости территории ЗЛН, но и демонстрирует конкретные участки, где требуется создание дополнительных ПЗЛП. Общие пространственные закономерности изменения лесистости в целом соответствуют оценкам на уровне административных районов и согласуются с природными особенностями региона: ростом аридности с северо-запада на юго-восток. При этом даже в районах с относительно высокой защитной лесистостью её величина очень неравномерна на уровне отдельных сельскохозяйственных полей. Это подчёркивает важность использования детальных карт ЗЛН для планирования лесомелиоративных мероприятий на региональном уровне. Подобные карты открывают возможности для дальнейшего анализа защищённости полей с учётом их пространственной конфигурации и положения в рельефе, что может значительно повысить эффективность работ по созданию систем адаптивно-ландшафтного земледелия и формированию агролесомелиоративных систем.

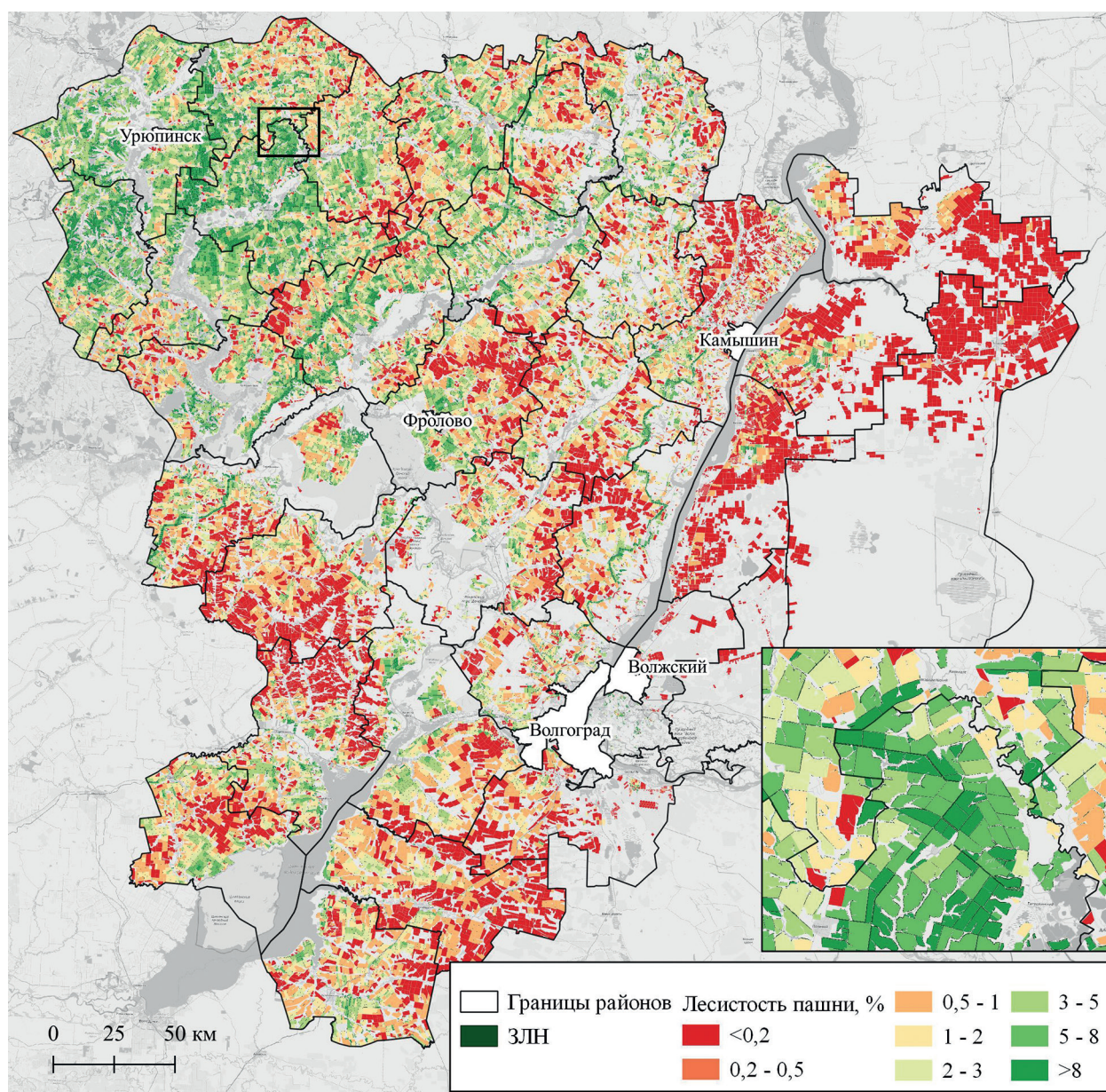


Рис. 6. Оценка защитной лесистости используемой пашни Волгоградской области на уровне отдельных полей на основе бисезонного индекса леса BSFI

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало высокий потенциал применения спутниковых данных Sentinel-2 для задач региональной инвентаризации защитных лесных насаждений и полезащитных лесных полос. Ни один из рассмотренных спутниковых информационных продуктов о типах земного покрова не способен в полной мере обеспечить достоверную оценку защитной лесистости пашни из-за систематического пропуска линейных лесных полос, что вызвано их относительно небольшой шириной. Информационные продукты ESA WorldCover и Copernicus LCFM наиболее полно идентифицируют защитные лесные насаждения и характеризуются при этом самыми низкими показателями ложных определений леса. Объединение данных ESA WorldCover и Copernicus LCFM позволяет повысить полноту детектирования полезащитных лесных полос без существенного увеличения доли ошибок первого рода.

Наиболее близкие к официальным статистическим данным оценки получены на основе бисезонного индекса леса BSFI и лесного индекса FI. Принципиальным отличием BSFI от FI выступает использование зимних спутниковых данных ДЗЗ при наличии снежного покрова, что, с одной стороны, позволяет детектировать характерные для засушливых районов защитные лесные насаждения в угнетённом состоянии, а с другой — более надёжно разделять древесно-кустарниковую и травянистую растительность. При этом независимость от наличия наблюдений снежного покрова становится преимуществом FI, что может быть критически важным для южных регионов, где стабильный снежный покров устанавливается крайне редко. Недостатком FI выступает относительно большая доля ложных определений леса, в том числе на пашне, что отчасти может быть решено использованием данных за несколько лет. Оба индекса характеризуются перепутыванием высокостебельной околородной и древесно-кустарниковой растительности. Применение буферной зоны вокруг сельскохозяйственных полей отчасти позволяет снизить долю ошибок первого рода, свойственных индексам леса, при идентификации полезащитных лесных полос.

Для первичной оценки площади полезащитных лесных насаждений рекомендуется использование растровых масок или векторных границ сельскохозяйственных полей и данных информационных продуктов ESA WorldCover, Copernicus LCFM, в том числе результата их объединения. Индексы леса BSFI и FI дают возможность получения более полной информации, но их применение сопряжено с потенциальными ложными определениями леса. Для решения этой проблемы возможен подход с формированием обучающей выборки на основе данных ESA WorldCover и Copernicus LCFM с последующей классификацией спутниковых изображений по маске древесно-кустарниковой растительности, созданной на основе индексов BSFI или FI, для чего требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 126031818938-6) с использованием сервиса «Вега-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Васильченко А. А., Выприцкий А. А. Картографирование лесных насаждений Волгоградской области по данным ДЗЗ с использованием индексов BSFI и NDWI // Геодезия и картография. 2023. Т. 84. № 10. С. 39–49. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-39-49.

4. Выприцкий А. А., Шинкаренко С. С. Анализ влияния почвенно-климатических условий на сохранность государственных защитных лесных полос на основе данных Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 147–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.
5. Дубенок Н. Н., Танюкевич В. В., Бабошко О. И. Фитонасыщенность полезащитных лесных полос и их мелиоративное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестн. российской с.-х. науки. 2016. № 1. С. 27–30.
6. Кашицкий А. В., Лупян Е. А. Архив информационных продуктов о частоте наблюдения типов поверхности на основе данных спутников Sentinel-2 и возможности его применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 335–342. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-335-342.
7. Кашицкий А. В., Бурцев М. А., Прошин А. А. Технология создания безоблачных композитивных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 76–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
8. Кулик К. Н., Иванов А. Л., Рулев А. С., Свинцов И. П., Павловский Е. С., Петров В. И., Барабанов А. Т., Манаенков А. С., Васильев Ю. И., Жданов Ю. М., Зыков И. Г., Кулик Н. Ф., Крючков С. Н., Маланина З. И., Семенютина А. В., Сухоруких Ю. И., Шульга В. Д., Юфеев В. Г. Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2025 года, переработанная и дополненная. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 36 с.
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., Сычуглов 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. Нарожняя А. Г., Чендев Ю. Г. Изучение современного экологического состояния лесных полос с использованием ГИС и ДДЗ // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформац. обеспечение устойчивого развития территорий: материалы Международ. 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.
11. Национальный атлас почв Российской Федерации / гл. ред. С. А. Шоба. М.: Изд-во «Астрель», 2011. 632 с.
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 «Изд-во МБА», 2019. 476 с.
13. Рулев А. С., Кошелева О. Ю., Шинкаренко С. С. Оценка лесистости агроландшафтов юга приволжской возвышенности по данным NDVI // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 4 (44). С. 32–39.
14. Силова В. А. Влияние лесомелиоративного обустройства на продуктивность сельскохозяйственных угодий в условиях сухостепной зоны // Науч. журн. Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 2. С. 68–81. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-68-81.
15. Синельникова К. П., Берденгалиева А. Н., Матвеев Ш. и др. Картографирование пахотных земель в агроландшафтах Волгоградской области по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 85–96. DOI: 10.31857/S0205961423050081.
16. Терехин Э. А. Влияние лесистости залежных земель лесостепи на спектрально-отражательные характеристики по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 223–235. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.
17. Терехов А. Г., Макаренко Н. Г., Пак И. Т. Автоматический алгоритм классификации снимков Quickbird в задаче оценки полноты леса // Компьютер. оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 580–583. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583.
18. Чеплянский И. Я., Турчин Т. Я., Ермолова А. С. Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России // Изв. вузов. Лесной журн. 2022. № 3. С. 44–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59.
19. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Возможности оценки сомкнутости защитных лесных насаждений на основе бисезонного индекса леса и материалов съёмки БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 189–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
20. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Васильченко А. А. Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 207–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.

21. Begimova M. Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts // E3S Web of Conf. 2021. V. 227. Article 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
22. Bourgoin C., Verhegghen A., Carboni S. et al. GFC2020: a global map of forest land use for year 2020 to support the EU Deforestation Regulation // Earth System Science Data. 2026. V. 18. No. 2. P. 1331–1365. DOI: 10.5194/essd-18-1331-2026.
23. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al. Dynamic world, near real-time global 10 m land use land cover mapping // Scientific Data. 2022. V. 9. Article 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
24. Gong P., Liu H., Zhang M. et al. Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 // Science Bull. 2019. V. 64. P. 370–373. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
25. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
26. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 4704–4707. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
27. 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. Article 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
28. Kulik K. N., Barabanov A. T., Manaenkov A. S. Forecasting the development of protective afforestation in Russia until 2020 // Studies on Russian Economic Development. 2015. V. 26. No. 4. P. 351–358. DOI: 10.1134/S1075700715040073.
29. Land Cover and Forest Monitoring (LCFM). Copernicus Land Monitoring Service Land Cover 2020, version 1. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2025. DOI: 10.2909/602507b2-96c7-47bb-b79d-7ba25e97d0a9.
30. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A. et al. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
31. Pugacheva A. M. Functionality of zonal agroforestry systems on agricultural land of dry territories // Forests. 2023. V. 14. Article 2364. DOI: 10.3390/f14122364.
32. Yang X., Li F., Fan W. et al. Evaluating the efficiency of wind protection by windbreaks based on remote sensing and geographic information systems // Agroforestry Systems. 2021. V. 95. P. 353–365. DOI: 10.1007/s10457-021-00594-x.
33. Ye W., Li X., Chen X., Zhang G. A spectral index for highlighting forest cover from remotely sensed imagery // Proc. SPIE. Land Surface Remote Sensing II. 2014. V. 9260. Article 92601L. DOI: 10.1117/12.2068775.
34. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100 // <https://zenodo.org>. 20.10.2021. DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
35. Zhang X., Liu L., Zhao T. et al. GLC_FCS10: a global 10 m land-cover dataset with a fine classification system from Sentinel-1 and Sentinel-2 time-series data in Google Earth Engine // Earth System Science Data. 2025. V. 17. No. 8. P. 4039–4062. DOI: 10.5194/essd-17-4039-2025.

Application of satellite forest indices and global land cover data to regional shelterbelt mapping

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev, A. V. Kashnitskii

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

The relevance of assessing the condition and area of field-protective forest belts (shelterbelts) in Russia is driven by their ongoing degradation and absence of a unified inventory system. The aim of this study is to determine optimal methods for shelterbelt mapping at the regional level using Sentinel-2 satellite data. The research was conducted in Volgograd Region characterized by a wide range of soil and climatic conditions. We compared the results of mapping tree and shrub vegetation (TSV) obtained with the Bi-Seasonal Forest Index (BSFI), the Forest Index (FI), and seven global land cover products (ESA (European Space Agency) WorldCover, ESRI (Environmental Systems Research Institute) LandCover, FROM-GLC10 (Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover),

Dynamic World, GLC_FCS10 (Global 10 m Land-Cover dataset with Fine Classification System), Copernicus LCFM (Global Land Cover and Tropical Forest Mapping and Monitoring service), and JRC_GFC2020 (Joint Research Centre Global map of Forest Cover)). Validation of the indices against aerial photography showed that BSFI approximates canopy cover more accurately ($R^2 = 0.80$) than does FI ($R^2 = 0.73$). To identify shelterbelts specifically, 50-m buffer zones were constructed around agricultural fields, thereby minimizing confusion between tree and shrub vegetation and highly productive herbaceous vegetation. The results indicate that global land cover products systematically underestimate the protective forest cover of cropland (0.7–1.5 %), compared with official statistics (2.2 %). The BSFI demonstrated the best agreement with statistical data (cropland protective forest cover of 2.2 %), which is attributed to its ability to detect suppressed stands under arid conditions through the use of winter satellite images with snow cover. A hybrid approach combining ESA and Copernicus maps is proposed to increase completeness when generating a reference sample for classifying satellite remote sensing data by applying a TSV mask derived from forest indices; this requires further research. The findings can serve as a basis for assessing shelterbelt area and protective forest cover of cropland at both the regional and national levels.

Keywords: protective afforestation, remote sensing, mapping, Volgograd Region, tree and shrub vegetation, agroforestry

Accepted: 16.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-242-257

References

1. Antonov S.A., Spatial analysis of protective forest plantations based on geographic information technologies and remote sensing data, *InterCarto. InterGIS. GI Support of Sustainable Development of Territories: Proc. Intern. Conf.*, Moscow: Moscow University Press, 2020, V. 26, Pt. 2, pp. 408–420 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Vasilchenko A.A., Vypritskiy A.A., Mapping forest plantations of the Volgograd region according to remote sensing data using the BSFI and NDWI indices, *Geodeziya i kartografiya*, 2023, V. 84, No. 10, pp. 39–49 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-39-49.
4. Vypritskiy A.A., Shinkarenko S.S., Analysis of soil and climatic factors influence on the protective forest condition based on Sentinel-2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 147–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.
5. Dubenok N.N., Tanyukevich V.V., Baboshko O.I., Phytosaturation of field protecting forest stripes and their ameliorative influence on cropping power of agricultural crops, *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2016, No. 1, pp. 27–30 (in Russian).
6. Kashnitskii A.V., Loupian E.A., Archive of information products on surface type observation frequency based on Sentinel-2 data and its possible applications, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 335–342 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-335-342.
7. Kashnitskii A.V., Burtsev M.A., Proshin A.A., Technology to create cloud-free composites from Sentinel-2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
8. Kulik K.N., Ivanov A.L., Rulev A.S., Svintsov I.P., Pavlovskiy E.S., Petrov V.I., Barabanov A.T., Manaenkov A.S., Vasilev Yu.I., Jdanov Yu.N., Zikov I.G., Kulik N.F., Kryuckov S.N., Malanina Z.I., Semenyutina A.V., Suchorukich Yu.I., Schulga V.D., Yuferev V.G., *Strategiya razvitiya zashchitnogo lesorazvedeniya v Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda, pererabotannaya i dopolnennaya* (The strategy of protective forestation development in Russian Federation for a period till 2025 year, remade and supplemented), Volgograd: FSC of agroecology RAS, 2018, 36 p. (in Russian).
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, V. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
10. Narozhnyaya A.G., Chendev Yu.G., The study of the modern ecological state of shelterbelts using GIS and remote sensing data, *InterCarto. InterGIS. GI Support of Sustainable Development of Territories: Proc.*

- Intern. Conf.*, Moscow: Moscow University Press, 2020, V. 26, Pt. 2, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65.
11. *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* (National soil atlas of the Russian Federation), S.A. Shoba (ed.), Moscow: Astrel Publishing House, 2011, 632 p. (in Russian).
12. *Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturalnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)"* (Global climate and soil cover of Russia: Desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry). National report), R. S.-Kh. Edel'geriev (ed.), V. 2, Moscow: OOO "Izd. MBA", 2019, 476 p. (in Russian).
13. 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 professional'noe obrazovanie*, 2016, No. 4 (44), pp. 32–39 (in Russian).
14. Silova V. A., Influence of forest reclamation improvement on the production area yield in the dry steppe zone, *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii*, 2021, V. 11, No. 2, pp. 68–81 (in Russian), DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-68-81.
15. Sinelnikova K. P., Berdengalieva A. N., Matveev Sh. et al., Mapping arable lands in agricultural landscapes of Volgograd Region according to remote sensing data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, No. 10, pp. 1494–1502, DOI: 10.1134/S0001433823120228.
16. Terekhin E. A., Effect of abandoned agricultural lands forest cover on Sentinel-2 spectral response in forest-steppe natural zone, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 223–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.
17. Terekhov A. G., Makarenko N. G., Pak I. T., Automatic classification algorithm of quick bird images in the problem of evaluating of forest completeness, *Komp'yuternaya optika*, 2014, V. 38, No. 3, pp. 580–583 (in Russian), DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583.
18. Cheplyanskii I. Ya., Turchin T. Ya., Ermolova A. S., Remote monitoring of state forest shelterbelts in the steppe zone of European Russia, *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, No. 3, pp. 44–59 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59.
19. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Possibilities of assessing forest belts canopy closure using Sentinel-2 based Bi-Seasonal Forest Index and UAV data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 1, pp. 189–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
20. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Vasilchenko A. A., Method for protective forest plantations mapping based on multi-temporal high spatial resolution satellite images and Bi-Season Forest Index, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 207–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
21. Begimova M., Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts, *E3S Web of Conf.*, 2021, V. 227, Article 02004, DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
22. Bourgoin C., Verhegghen A., Carboni S. et al., GFC2020: a global map of forest land use for year 2020 to support the EU Deforestation Regulation, *Earth System Science Data*, 2026, V. 18, No. 2, pp. 1331–1365, DOI: 10.5194/essd-18-1331-2026.
23. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al., Dynamic world, near real-time global 10 m land use land cover mapping, *Scientific Data*, 2022, V. 9, Article 251, DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
24. Gong P., Liu H., Zhang M. et al., Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017, *Science Bull.*, 2019, V. 64, pp. 370–373, DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
25. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change, *Science*, 2013, V. 342, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
26. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al., Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning, *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2021, pp. 4704–4707, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
27. 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, Article 012065, DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
28. Kulik K. N., Barabanov A. T., Manaenkov A. S., Forecasting the development of protective afforestation in Russia until 2020, *Studies on Russian Economic Development*, 2015, V. 26, No. 4, pp. 351–358, DOI: 10.1134/S1075700715040073.
29. *Land Cover and Forest Monitoring (LCFM). Copernicus Land Monitoring Service Land Cover 2020, version 1*, NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2025, DOI: 10.2909/602507b2-96c7-47bb-b79d-7ba25e97d0a9.
30. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.

31. Pugacheva A. M., Functionality of zonal agroforestry systems on agricultural land of dry territories, *Forests*, 2023, V. 14, Article 2364, DOI: 10.3390/f14122364.
32. Yang X., Li F., Fan W. et al., Evaluating the efficiency of wind protection by windbreaks based on remote sensing and geographic information systems, *Agroforestry Systems*, 2021, V. 95, pp. 353–365, DOI: 10.1007/s10457-021-00594-x.
33. Ye W., Li X., Chen X., Zhang G., A spectral index for highlighting forest cover from remotely sensed imagery, *Proc. SPIE. Land Surface Remote Sensing II*, 2014. V. 9260, Article 92601L, DOI: 10.1117/12.2068775.
34. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al., ESA WorldCover 10 m 2020 v100, <https://zenodo.org>, 20.10.2021, DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
35. Zhang X., Liu L., Zhao T. et al., GLC_FCS10: global 10 m land-cover dataset with fine classification system from Sentinel-1 and Sentinel-2 time-series data in Google Earth Engine, *Earth System Science Data*, 2025, V. 17, No. 8, pp. 4039–4062, DOI: 10.5194/essd-17-4039-2025.