

Возможности оценки сомкнутости защитных лесных насаждений на основе бисезонного индекса леса и материалов съёмки БПЛА

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: shinkarenko.stas@gmail.com

Защитные лесные насаждения (ЗЛН) играют важную роль в предотвращении деградации агроландшафтов, но из-за достижения предельного возраста значительная часть ЗЛН находится в неудовлетворительном состоянии. Существующие методы оценки сомкнутости ЗЛН, часто выступающей в качестве критерия их сохранности, очень трудоёмки, так как основываются на экспертном дешифрировании данных аэрокосмической съёмки сверхвысокого разрешения, использовании топографических карт, планов и полевом обследовании с помощью приборов спутникового геопозиционирования. В статье представлены возможности определения сомкнутости ЗЛН с помощью бисезонного индекса леса BSFI (*англ.* Bi-Seasonal Forest Index) по данным Sentinel-2 и материалов аэрофотосъёмки (АФС). На основе анализа плотного облака точек, полученного по материалам АФС, был выделен полог древесно-кустарниковой растительности, после чего значения сомкнутости полога сопоставлены с данными BSFI. Значения индекса BSFI рассчитаны на основе радиометрически нормализованных ежемесячных композитов NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) за июнь—август и максимального альбеда годовых зимних композитов за период 2019–2022 гг. Установлена регрессионная зависимость BSFI и сомкнутости, коэффициент детерминации которой составил 0,86, а среднеквадратичная ошибка равна 14,5 %. Использование полученных результатов на практике позволит существенно сократить объём наземных обследований ЗЛН для определения их сохранности.

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

Одобрена к печати: 03.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202

Введение

Защитные лесные насаждения (ЗЛН) выполняют важную средообразующую функцию, препятствуя развитию процессов ветровой и водной эрозии, способствуют повышению биоразнообразия агроландшафтов и урожайности сельскохозяйственных культур (Агролесомелиорация..., 2006). В настоящее время значительная часть ЗЛН приходит в неудовлетворительное состояние из-за достижения предельного возраста, повреждений пожарами и вредителями, но при этом методы оценки их состояния на больших территориях по спутниковым данным проработаны недостаточно (Засоба и др., 2019; Чеплянский и др., 2022). Большинство существующих методов оценки сохранности ЗЛН, в качестве критерия которой часто используется показатель их сомкнутости, очень трудоёмки, так как основываются на определении проектных границ насаждений по высокодетальным спутниковым данным, топографическим картам, с помощью GNSS-приёмников (*англ.* Global Navigation Satellite Systems) и выделении полога древесно-кустарниковой растительности (ДКР) по данным аэрокосмической съёмки сверхвысокого пространственного разрешения (Антонов, 2020; Нарожная, Чендев, 2020; Рулев и др., 2014; Ткаченко, Кошелев, 2017; Koshelev et al., 2021). При этом в связи с небольшой шириной полос и лент ЗЛН (10–100 м) использование данных более низкого пространственного разрешения, например Landsat, затруднено (Чеплянский и др., 2022). Высокдетальные спутниковые данные, как правило, имеют высокую стоимость, что существенно ограничивает их использование для картографирования ЗЛН на больших территориях. Тем не менее спутниковая информация сверхвысокого пространственного разрешения

используется для создания эталонов, по которым возможно проведение оценки сомкнутости лесов на основе данных более низкого разрешения (Терехов и др., 2014).

Пиксели спутниковых изображений Sentinel-2 имеют сопоставимые с шириной полезащитных лесных полос размеры и существенно меньшие в сравнении с противоэрозионными ЗЛН и государственными защитными лесными полосами (до 100 м в ширину), что позволяет проводить на их основе картографирование ЗЛН (Выприцкий, Шинкаренко, 2022; Шинкаренко и др., 2022а; Begimova, 2021). При этом очень важно не только определять наличие ЗЛН, но и оценивать сомкнутость сохранившейся ДКР, так как этот показатель влияет на мелиоративную эффективность насаждений (Силова, 2021; Yang et al., 2021). Вместе с тем даже усохшие и усыхающие насаждения способны выполнять защитные функции, поскольку наибольшую мелиоративную роль играют стоящие вертикально стволы деревьев, так как в течение всего года создают препятствие ветровому потоку (Дубенок и др., 2016). Картографирование проектных границ ЗЛН — очень трудоёмкая задача, и актуальным представляется решение вопроса оценки сомкнутости ЗЛН на основе пиксельного анализа спутниковых изображений без необходимости предварительного визуального оконтуривания ЗЛН. Источником данных для подобной оценки сомкнутости ЗЛН могут выступать материалы аэрофотосъёмки (АФС), получаемые беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Современные БПЛА с вращающимся крылом (вертолётного типа) достаточно просты в управлении, легко транспортируются, благодаря чему АФС может производиться параллельно с лесотаксационными работами.

Цель настоящего исследования заключается в разработке подхода для определения сомкнутости полога ЗЛН на основе бисезонного индекса леса BSFI, рассчитываемого по данным Sentinel-2, полученным в период вегетации и в зимний период при наличии снежного покрова, и с использованием выборочных данных АФС с БПЛА. Для этого были решены следующие задачи: проведение и фотограмметрическая обработка АФС для выделения древесного полога, расчёт BSFI, сопоставление значений BSFI и фактической сомкнутости ДКР по данным АФС с последующей экстраполяцией на большую территорию с наличием ЗЛН.

Объект, материалы и методы исследования

В качестве объекта исследований выбраны государственные защитные лесные полосы (ГЗЛП) на территории Волгоградской обл.: водораздельные ГЗЛП «Камышин — Волгоград», «Пенза — Каменск» и приречные ГЗЛП «Саратов — Астрахань» и «Воронеж — Ростов-на-Дону» (рис. 1, см. с. 191). Выбор этих ГЗЛП обусловлен достаточной для использования данных Sentinel-2 шириной (60–100 м) и наличием участков различной сохранности (Выприцкий, Шинкаренко, 2022). Это позволяет выполнить сопоставление спектрально-отражательных характеристик ЗЛН различной сомкнутости по данным Sentinel-2, материалов наземных исследований и съёмок БПЛА. Одним из показателей, коррелирующих с сомкнутостью полога древесно-кустарниковой растительности, является бисезонный индекс леса BSFI (*англ.* Bi-Seasonal Forest Index), показавший высокую точность при картографировании ЗЛН Саратовской обл. (Шинкаренко и др., 2022а). Использование данных коротковолнового инфракрасного диапазона в период вегетации, показавших сильную связь с сомкнутостью лесных насаждений в лесостепи (Терехин, 2022), для картографирования ЗЛН затруднено из-за более низкого пространственного разрешения (20 м/пиксель) по сравнению с видимым и ближним инфракрасным диапазонами (10 м/пиксель).

Расчёт BSFI основан на нормализованной разности минимизированного за вегетационный сезон NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и максимальных значений альбедо в зимний период при наличии снежного покрова. Минимизация NDVI необходима для разделения ДКР, убранных или вспаханных сельскохозяйственных полей и естественной растительности после окончания вегетации, так как по одномоментному изображению это сделать затруднительно (Рулев и др., 2016; Терехин, 2020, 2021; Шинкаренко, Барталев, 2020).

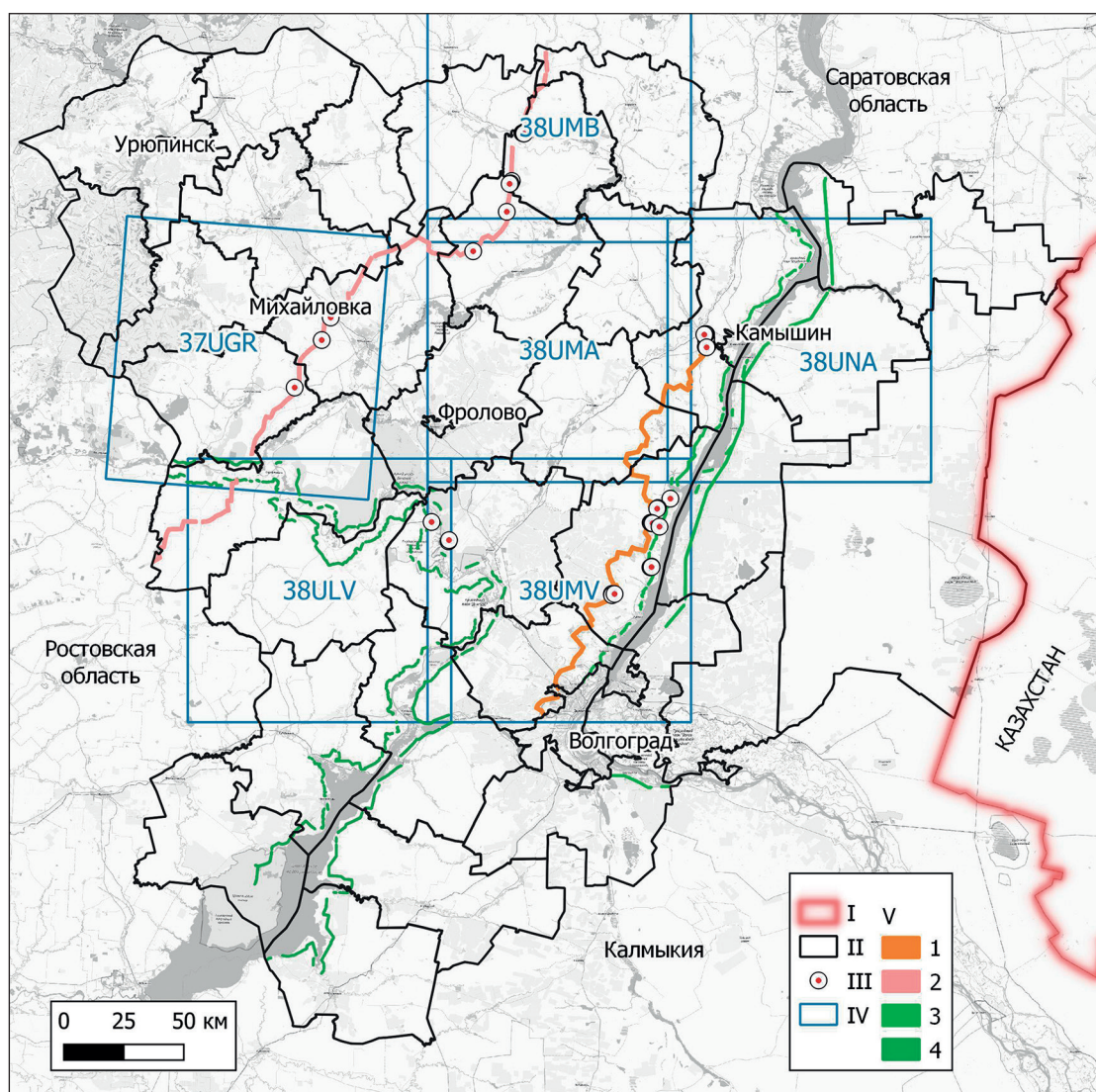


Рис. 1. Расположение тестовых полигонов в Волгоградской обл. I — государственная граница РФ; II — границы муниципальных районов; III — тестовые полигоны; IV — тайлы Sentinel-2; V — ГЗЛП: 1 — «Камышин–Волгоград», 2 — «Пенза–Каменск», 3 — «Саратов–Астрахань», 4 — «Воронеж–Ростов-на-Дону»

В зимний период полог ДКР обладает меньшей яркостью по сравнению с покрытыми снегом участками травянистой растительности, что позволяет выделить ДКР (Барталев и др., 2016; Жарко и др., 2018; Ховратович и др., 2019). Таким образом, чем больше занятая ДКР доля площади на соответствующих пикселях спутниковых изображений участках, тем выше значения NDVI и ниже альbedo в зимний период, а следовательно, выше значения BSFI. Это создаёт предпосылки для оценки сомкнутости полога ЗЛН на основе BSFI, определяемого по спутниковым данным.

Исследование основано на данных аэросъёмки с БПЛА DJI Mavic Air, выполненной в августе и сентябре 2022 г. Аэросъёмка проводилась с высоты 75 м с продольным и поперечным перекрытием 80 % в видимом диапазоне, полётные задания формировались с помощью программного обеспечения Pix4DCapture. Фотограмметрическая обработка выполнялась в программе Agisoft Photoscan. Аэросъёмка была проведена на 36 участках общей площадью 262,4 га (таблица). Обработка данных АФС заключалась в построении плотного облака точек, на основе которого создавались трёхмерная модель, цифровая модель местности и ортофотоплан (рис. 2). С помощью классификации плотного облака точек исключалась ДКР, что позволило получить цифровые модели рельефа.

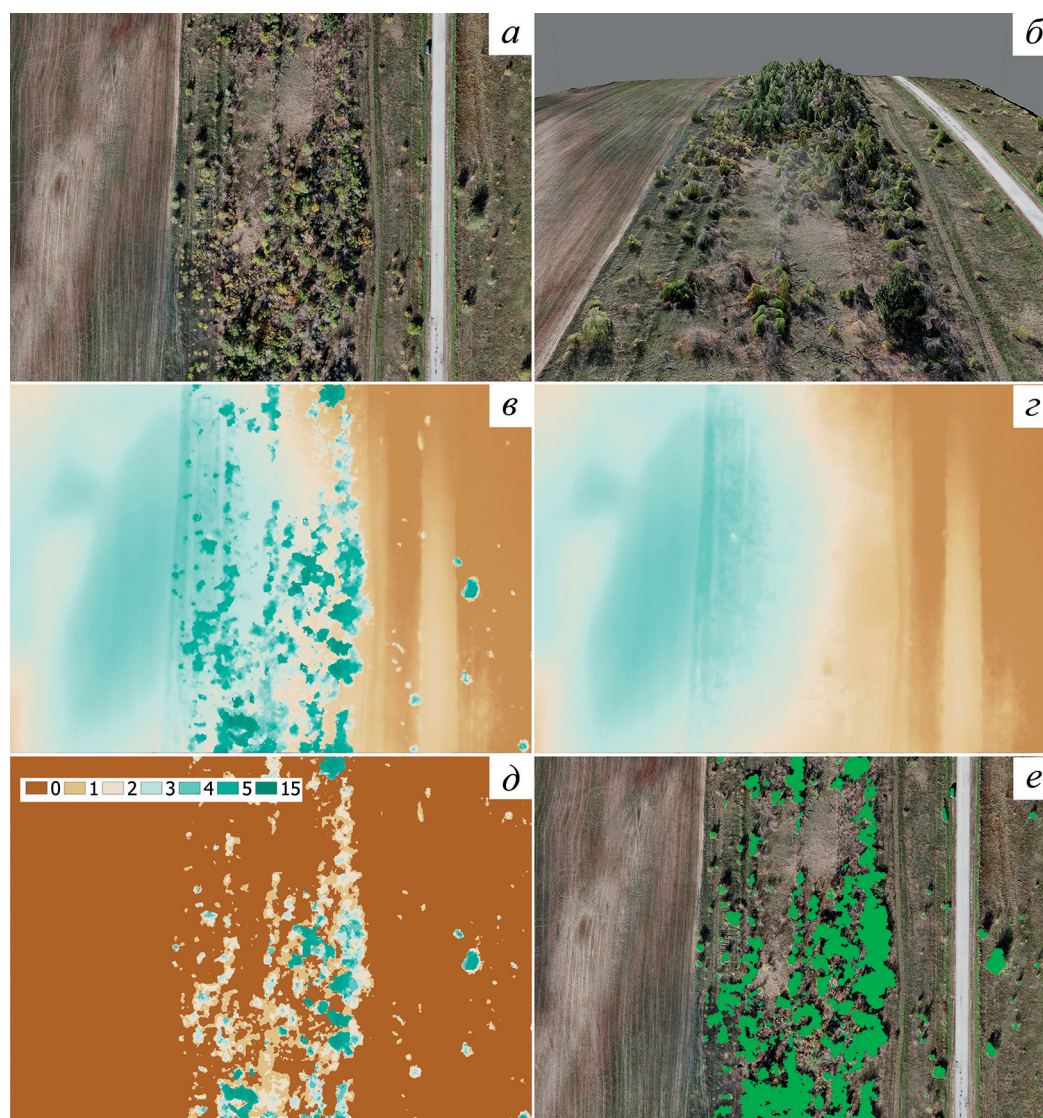


Рис. 2. Пример картографирования полога ДКР по данным съёмки БПЛА: а — ортофотоплан; б — трёхмерная модель; в — ЦММ; г — ЦМР; д — разница ЦММ и ЦМР (в метрах); е — полог ДКР

Распределение тестовых полигонов по государственным защитным лесным полосам

ГЗЛП	«Пенза — Каменск»	«Камышин — Волгоград»	«Воронеж — Ростов-на-Дону»	«Саратов — Астрахань»	Всего
Количество полигонов	10	17	3	5	36
Площадь, га	70,0	107,8	32,7	51,8	262,4
Преобладающие породы*	Дч, Яо, Жт, Кт	Вп, Яо, Ск	Вп, Яо, Ро, Дч, Жт, Кт	Вп, Яо, Ск	—
Количество пикселей Sentinel-2	5096	10 553	3272	8934	27 855

* Дч — дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), Яо — ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), Жт — жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.), Кт — клён татарский (*Acer tataricum* L.), Вп — вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), Ро — робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.), Ск — скумпия кожевенная (*Cotinus coggygia* Scop.).

Пространственное разрешение ортофотопланов составило 2,5 см/пиксель (см. рис. 2а), разрешение цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) — 10 см/пиксель (см. рис. 2в, г). На основе разницы ЦММ и ЦМР (см. рис. 2д) определялась высота древесно-ку-

старниковой растительности (см. *рис. 2д*), за полог ДКР принималась растительность высотой более 1 м (см. *рис. 2е*). Подобный подход широко используется при выделении ДКР по данным аэрофотосъёмки (Медведев и др., 2020; Dronova et al., 2021; Lisein et al., 2013; Yu et al., 2022), так как обеспечивает достаточно высокую точность в сравнении с наземными измерениями высоты древостоев (Navarro et al., 2020). Кроме АФС при полевых работах определялся породный состав и состояние ЗЛН: хорошее, удовлетворительное или неудовлетворительное.

Спутниковые данные Sentinel-2 для расчёта BSFI были получены с помощью сервиса «Вега-Science» (Лупян и др., 2015). Использовались зимние ежегодные радиометрически нормализованные композитные изображения земной поверхности с наличием снежного покрова и ежемесячные композитные изображения NDVI июня–августа за 2019–2022 гг. (Барталев и др., 2022б; Кашницкий и др., 2022), что позволяет уменьшить влияние различий дат данных спутниковых наблюдений. Данные BSFI обрезались по границам ортофотопланов, и пиксели переводились в векторный формат для возможности расчёта зональной статистики по растровым данным АФС. Общее количество проанализированных пикселей Sentinel-2 составило 27,8 тыс. Для каждого пикселя Sentinel-2 BSFI по данным АФС определялось общее количество пикселей и количество пикселей, соответствующих ДКР, отношение которых принималось за величину сомкнутости. Обработка спутниковых данных и АФС проводилась в проекции UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator, универсальная поперечная проекция Меркатора) (зона 38N).

Результаты и обсуждение

Сопоставление значений BSFI пикселей Sentinel-2 и сомкнутости по данным АФС показано на *рис. 3* (см. с. 194). Коэффициент корреляции между этими показателями составил $r = 0,84$ ($p < 0,001$). Наиболее тесная связь отмечена для регрессионной зависимости между величинами сомкнутости и BSFI на основе сигмоиды (см. *рис. 3а*):

$$S = \frac{100}{1 + \exp(A \cdot \text{BSFI} + B)},$$

где S — сомкнутость, %; A, B — коэффициенты, которые зависят от исходных данных для расчёта BSFI и состояния ЗЛН.

Среди всех пикселей с полным отсутствием ДКР (нулевая сомкнутость) 99,6 % имеют значения BSFI, не превышающие нуля (см. *рис. 3б*). Исследования сомкнутости древостоев, проведённые авторами работ (Nasiri et al., 2022) на севере Ирана и (Pilas et al., 2020) в Хорватии на основе данных АФС, Sentinel-2 и методов машинного обучения «Случайный лес», метода опорных векторов, эластичной сети (ENet), библиотеки XGBoost, позволили получить максимальный коэффициент детерминации $R^2 = 0,67$ и минимальную среднеквадратичную ошибку (*англ.* Root Mean Square Error) RMSE = 18,9 % при использовании алгоритма «Случайный лес» в Иране и $R^2 = 0,79$ — в Хорватии на основе эластичной сети. Благодаря использованию BSFI удалось без применения методов машинного обучения получить значительно более высокую точность: $R^2 = 0,86$ и RMSE = 14,5 %.

Полученные зависимости позволили рассчитать сомкнутость ЗЛН в пределах анализируемых тайлов (*рис. 4, 5*, см. с. 194, 195). Расчётные значения сомкнутости завышены при фактических более 80–90 %, что может быть связано с недостаточным разрешением Sentinel-2 для определения отдельных выпавших деревьев или их небольших групп, отсутствие которых было зафиксировано АФС. Также по данным BSFI достаточно точно определены насаждения из кустарников и поросли деревьев высотой 1–1,5 м, которые не были выделены по данным АФС (см. *рис. 4в*). Кроме того, использование логистической функции приводит к ненулевым значениям сомкнутости даже при минимальных BSFI. По этой причине необходимо ограничивать минимальные значения области определения расчётных значений сомкнутости по данным BSFI. На *рис. 4* показан пример с минимальным порогом сомкнутости 10 %, а на *рис. 5* — 30 %.

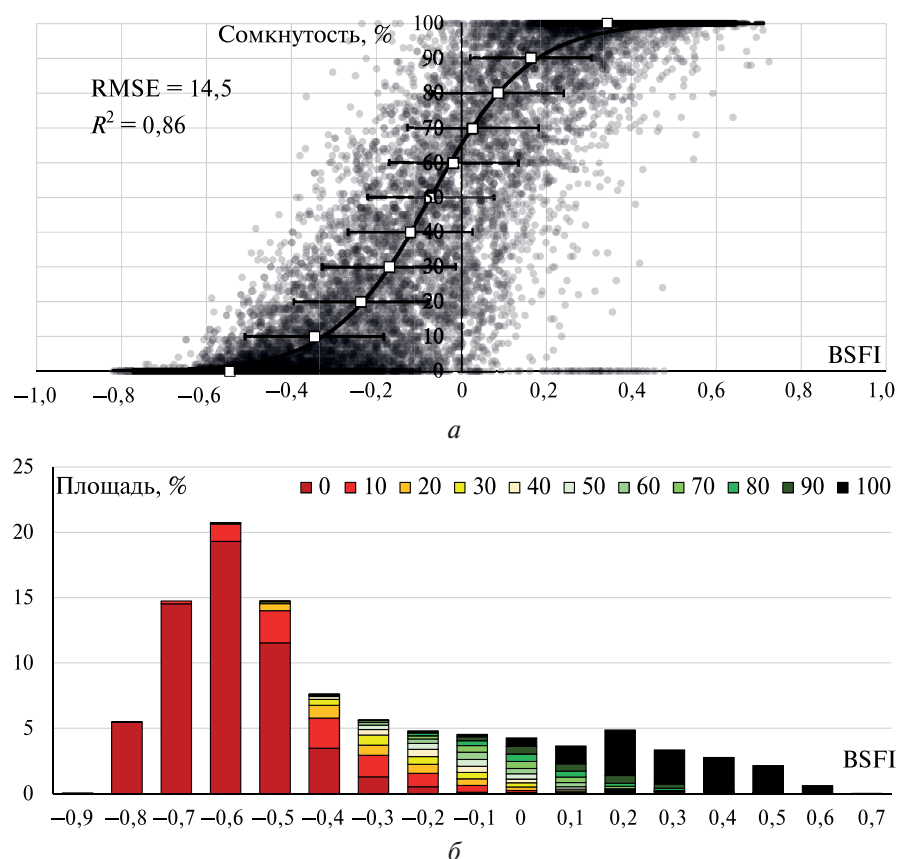


Рис. 3. Сопоставление значений BSFI пикселей Sentinel-2 и сомкнутости по данным АФС (а), планками показано стандартное отклонение средних значений BSFI; распределение количества пикселей с разной сомкнутостью ДКР (в процентах) по значениям BSFI (б)

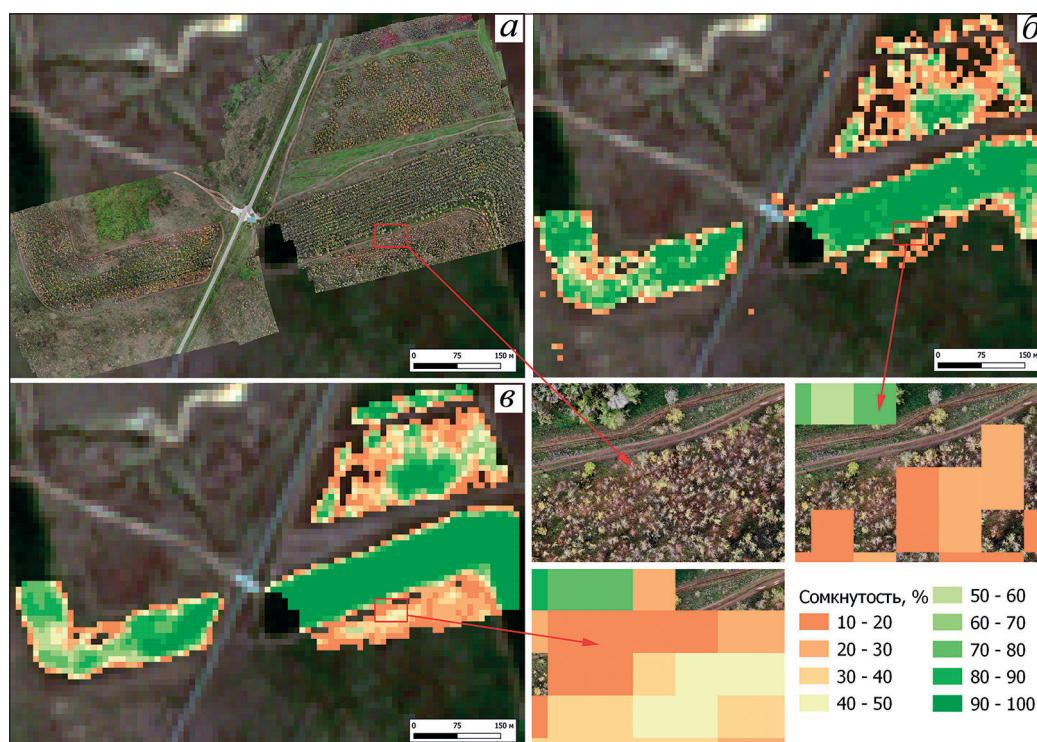


Рис. 4. Пример расчёта сомкнутости защитных лесных насаждений на основе BSFI ГЗЛП «Саратов – Астрахань»: а — ортофотоплан; б — фактические значения сомкнутости; в — расчётные значения сомкнутости. Красными прямоугольниками выделены увеличенные фрагменты

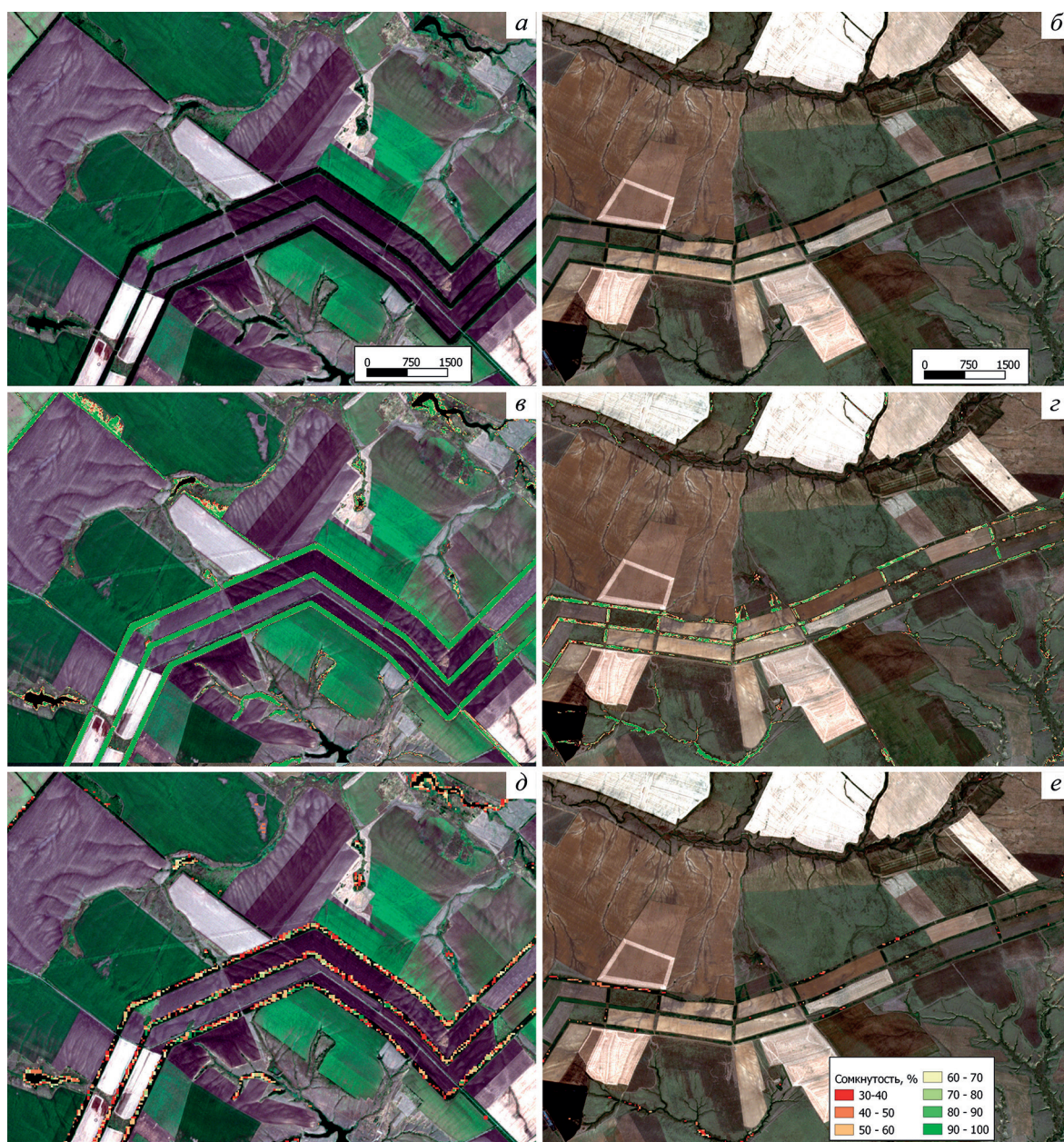


Рис. 5. Примеры расчёта сомкнутости ЗЛН на основе BSFI: а, б — изображения Sentinel-2 на август 2022 г.; в, г — сомкнутость на основе BSFI Sentinel-2; д, е — сомкнутость на основе данных Global Forest Change (Hansen, 2013)

Единственный глобальный информационный продукт сомкнутости ДКР высокого пространственного разрешения (30 м) с открытым доступом — Global Forest Change (GFC), содержащий сведения о состоянии древесного полога начиная с 2000 г. (Hansen et al., 2013). В результате сравнительного анализа данных GFC, фактических (по АФС) и расчётных значений сомкнутости по данным BSFI (см. рис. 5, 6, см. с. 196) установлены как недоучёт площадей ЗЛН, так и недооценка их сомкнутости по данным GFC. Эти данные ранее показали низкую точность при картографировании ЗЛН Саратовской обл. (Шинкаренко и др., 2022а), что может быть связано с недостаточно высоким разрешением исходных данных Landsat, использованных для этого продукта. Исследованные ЗЛН создавались в 1950–1970-х гг., поэтому достигли предельного возраста, из-за чего увеличение сомкнутости в период 2000–2022 гг. не могло быть существенным, тогда как фактор несовпадения дат АФС и спутниковых данных мог привести только к завышению оценок GFC из-за деградации древостоев после 2000 г.

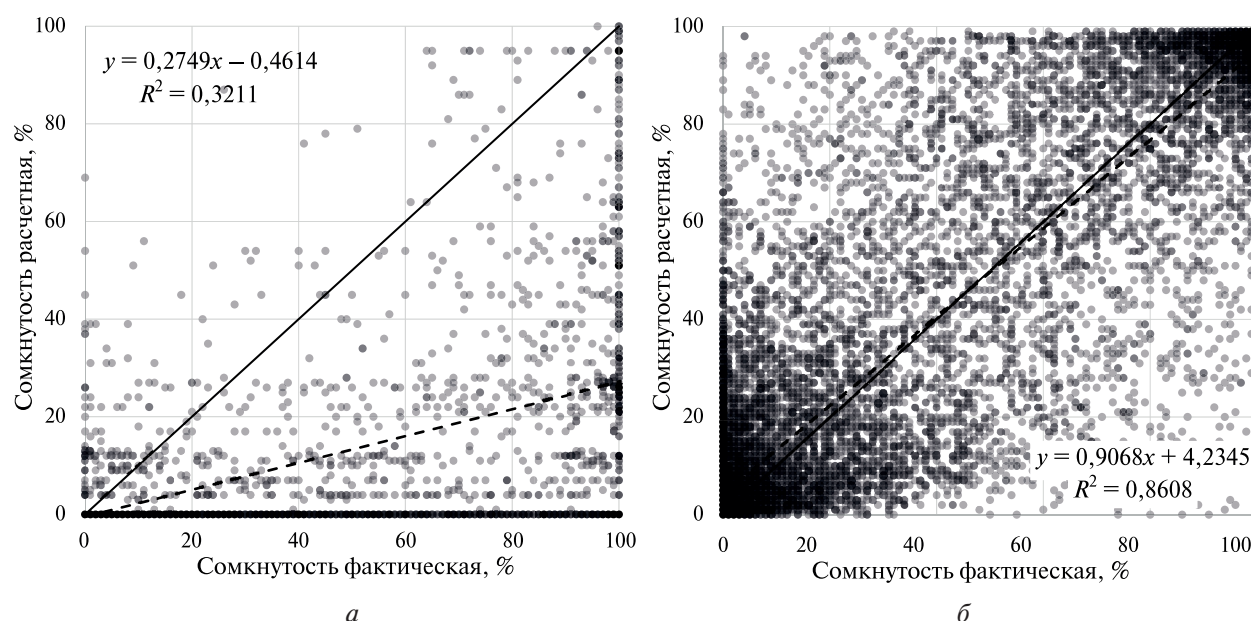


Рис. 6. Сопоставление фактической (по данным АФС) и расчётной сомкнутости Global Forest Change (а) и BSFI (б)

Одной из возможных причин неопределённости при расчёте сомкнутости по данным АФС как на основе BSFI, так и GFC могут быть ошибки географической привязки ортофотопланов, ЦММ, ЦМР и спутниковых данных. Точность бортового GPS-приёмника (англ. Global Positioning System — система глобального позиционирования) использованного БПЛА DJI Mavic Air составляет 3–6 м, что меньше ошибки геопозиционирования спутниковых данных Sentinel-2 (до 12 м). По мнению ряда исследователей (например, авторов работ (Chianussi et al., 2016; Yu et al., 2022)), ошибки геопривязки данных АФС мало влияют на результаты по сравнению со спутниковыми данными при картографировании, поэтому дополнительная привязка АФС по наземным опорным точкам, вероятно, не позволит существенно увеличить точность получаемых оценок.

Также на значения BSFI влияет состояние насаждений, поскольку при расчёте используется NDVI, величина которого зависит от жизненности древостоев ЗЛН. Сохранность исследованных ГЗЛП в Волгоградской обл., в свою очередь, существенно связана с почвенно-климатическими условиями и изменяется от 40 до 90 % (Выприцкий, Шинкаренко, 2022). Также некоторые участки ГЗЛП были повреждены ландшафтными пожарами (Шинкаренко и др., 2022б). По этим причинам результаты картографирования ЗЛН на основе бисезонного индекса леса BSFI в большей степени зависят от состояния древостоев, выраженного через NDVI, по сравнению с использованием только значений яркости в зимний период при наличии снежного покрова. Тем не менее для картографирования ЗЛН очень важно использовать минимизированные за вегетационный период значения NDVI с целью фильтрации сельскохозяйственных полей с необраным урожаем, пожнивными остатками или недостаточной мощностью снежного покрова, дорог, насыпей и других объектов, которые могут быть ошибочно отнесены к ДКР только по зимним спутниковым изображениям (Шинкаренко и др., 2022а). По этой причине сомкнутость насаждений в неудовлетворительном состоянии, рассчитанная на основе BSFI, может быть ниже фактической оценки, получаемой по данным АФС. Это связано с тем, что при фотограмметрической обработке к пологу были отнесены также суховершинные и усыхающие деревья, значения NDVI которых существенно ниже, чем у здоровых. В то же время по данным BSFI в полог ДКР чаще включаются кустарники и поросль по сравнению с АФС, что связано с их относительно небольшой высотой, из-за чего эта категория ДКР может быть не учтена при обработке аэроснимков.

Решение указанной проблемы в дальнейшем может быть связано с использованием для оценки сомкнутости только зимних данных при наличии снежного покрова в границах ма-

ски ДКР, которая может быть выделена на основе значений BSFI, что позволит снизить зависимость получаемых оценок от состояния ДКР. Состояние насаждений также может определяться в границах такой маски ДКР на основе различных вегетационных индексов и спектрально-отражательных характеристик без учёта данных яркости в период залегания снега, которые зависят только от наличия древостоев, но не от их жизненности. Поскольку и усыхающие насаждения способны выполнять защитные функции (Дубенок и др., 2016), то и сомкнутость с учётом деревьев в неудовлетворительном состоянии служит важной характеристикой мелиоративной эффективности ЗЛН (Силова, 2021; Yang et al., 2021). Тем более что в распавшихся древостоях зачастую отмечается мощный кустарниковый ярус или порослевое возобновление. Также одним из направлений дальнейших исследований на основе данных АФС может быть оценка высоты ЗЛН по данным лидарных спутниковых измерений ICESat-2 (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite), которые уже применяются в России (Барталев и др., 2022а).

Заключение

В результате исследований предложен достаточно точный ($R^2 = 0,86$, $RMSE = 14,5\%$) подход для определения сомкнутости защитных лесных насаждений на основе комплексного использования данных аэросъёмки в видимом диапазоне и бисезонного индекса леса BSFI, рассчитанного по спутниковым данным высокого пространственного разрешения Sentinel-2. Применение данного подхода позволит сократить объёмы полевых работ по определению состояния ЗЛН.

Получаемые оценки сомкнутости ДКР могут существенно зависеть от состояния древостоев: при неудовлетворительном состоянии значения BSFI ниже, чем при удовлетворительном и хорошем для одной и той же сомкнутости. Это связано с использованием NDVI для расчёта индекса BSFI, а также отнесением при обработке АФС к пологу ДКР сухих, усыхающих и ослабленных древостоев. Решением проблемы может стать раздельное использование для определения сомкнутости только зимних спутниковых данных при наличии снежного покрова и вегетационных индексов для оценки состояния древостоев в границах маски ДКР, выделенной на основе BSFI.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

При выполнении исследования использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможности информационного сервиса «Вега» (Loupian et al., 2022).

Литература

1. Агролесомелиорация. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с.
2. 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 междунар. 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.
3. 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.
4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. Дубенок Н. Н., Таниюкевич В. В., Бабошко О. И. Фитонасыщенность полевых защитных лесных полос и их мелиоративное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестн. российской с.-х. науки. 2016. № 1. С. 27–30.
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. Засоба В. В., Чеплянский И. Я., Поповичев В. В. Семидесятилетний опыт создания государственных защитных лесных полос в степной зоне России // Живые и биокосные системы. 2019. № 27. С. 3.
10. Кашницкий А. В., Бурцев М. А., Прошин А. А. Технология создания безоблачных композитных 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.
11. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий 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.
12. Медведев А. А., Тельнова Н. О., Кудиков А. В., Алексеенко Н. А. Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 150–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
13. 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 междунар. 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.
14. Рулев А. С., Юферева 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 высш. образование. 2016. № 4(44). С. 24–32.
16. 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.
17. 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.
18. Терехин Э. А. Многолетние изменения спектрально-отражательных признаков залежных земель в различных природно-климатических условиях европейской территории России в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 111–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122.
19. 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.
20. Терехов А. Г., Макаренко Н. Г., Пак И. Т. Автоматический алгоритм классификации снимков Quickbird в задаче оценки полноты леса // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 580–583. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583.
21. Ткаченко Н. А., Кошелев А. В. Картографирование защитной лесистости агроландшафтов волгоградского Заволжья // Вестн. АПК Ставрополя. 2017. № 2(26). С. 137–143.
22. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашницкий А. В. Метод детектирования изменений лесов на основе попиксельной 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.

23. *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.
24. *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.
25. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Васильченко А. А.* (2022a) 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.
26. *Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н.* (2022b) Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 1. С. 1–12. DOI: 10.31857/S2587556622010113.
27. *Begimova M.* Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts // E3S Web Conf. 2021. V. 227. Art. No. 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
28. *Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastris C., Rindinella A., Corona P.* Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. V. 47. P. 60–68. DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.005.
29. *Dronova I., Kislik C., Dinh Z., Kelly M.* A Review of Unoccupied Aerial Vehicle Use in Wetland Applications: Emerging Opportunities in Approach, Technology, and Data // Drones. 2021. V. 5. No. 4. Art. No. 45. DOI: 10.3390/drones5020045.
30. *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.
31. *Koshelev A. V., Tkachenko N. A., Shatrovskaya M. O.* Decoding of forest belts using satellite images // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 875. Art. No. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
32. *Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P.* A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery // Forests. 2013. V. 4. No. 4. P. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922.
33. *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. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
34. *Nasiri V., Darvishsefat A. A., Arefi H., Griess V. C., Sadeghi S. M. M., Borz S. A.* Modeling Forest Canopy Cover: A Synergistic Use of Sentinel-2, Aerial Photogrammetry Data, and Machine Learning // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 6. Art. No. 1453. DOI: 10.3390/rs14061453.
35. *Navarro A., Young M., Allan B., Carnell P., Macreadle P.* The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate aboveground biomass of mangrove ecosystems // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 242. Art. No. 111747. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111747.
36. *Pilas I., Gašparović M., Novkinic A., Klobucar D.* Mapping of the Canopy Openings in Mixed Beech — Fir Forest at Sentinel-2 Subpixel Level Using UAV and Machine Learning Approach // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 3925. DOI: 10.3390/rs12233925.
37. *Yang X., Li F., Fan W., Liu G., Yu Y.* 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.
38. *Yu T., Ni W., Zhang Z., Liu Q., Sun G.* Regional Sampling of Forest Canopy Covers Using UAV Visible Stereoscopic Imagery for Assessment of Satellite-Based Products in Northeast China // J. Remote Sensing. 2022. V. 2022. Art. No. 9806802. DOI: 10.34133/2022/9806802.

Possibilities of assessing forest belts canopy closure using Sentinel-2 based Bi-Seasonal Forest Index and UAV data

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: shinkarenko.stas@gmail.com

Protective forest plantations (PFP) play an important role in preventing the degradation of agricultural landscapes, but due to reaching the age limit, a significant part of the PFPs is in an unsatisfactory condition. The current methods for evaluating the canopy density, which is often considered as a condition of plantings' safety, are very laborious since they are based on expert interpretation of ultra-high resolution aerospace survey data, topographic maps, plans and field surveys using satellite geolocation devices. The article presents the ways to determine PFP density using BSFI (Bi-Seasonal Forest Index) derived from Sentinel-2 data and aerial photography materials from UAV instruments. The analysis of a dense cloud of points obtained by the UAV allowed us to identify a canopy of trees and shrubs and compare the canopy density values with the BSFI data. The BSFI values were calculated based on radiometrically normalized monthly NDVI composites for June–August and the maximum albedo of annual winter composites for the period 2019–2022. We have established a regression dependence of BSFI and density with a coefficient of determination equal to 0.86. The root-mean-square error makes 14.5 %. The use of the obtained results in practice will significantly reduce the volume of ground-based surveys of PFPs to determine their safety.

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

Accepted: 03.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202

References

1. *Agrolesomeliorsiya* (Agroforestry), Volgograd: VNIALMI, 2006, 746 p. (in Russian).
2. 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 Univ. Press, 2020, Vol. 26, Pt. 2, pp. 408–420 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420.
3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
4. 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. 5, pp. 195–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
5. 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.
6. 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, Vol. 19, No. 4, pp. 147–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.
7. 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).
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. Zasoba V. V., Cheplyanskii I. Ya., Popovichev V. V., Seventy years of experience in creating state protective forest belts in the steppe zone of Russia, *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2019, No. 27, p. 3 (in Russian).
10. 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, Vol. 19, No. 4, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
11. 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).
12. Medvedev A. A., Telnova N. O., Kudikov A. V., Alekseenko N. A., Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 150–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
13. 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 Univ. Press, 2020, Vol. 26, Part 2, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65.
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. Silova V. A., Influence of forest reclamation improvement on the production area yield in the dry steppe zone, *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii*, 2021, Vol. 11, No. 2, pp. 68–81 (in Russian), DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-68-81.
17. 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.
18. Terekhin E. A., Long-term changes in spectral response of abandoned agricultural lands in various climate and environmental conditions of European Russia in the early 21st century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 111–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122.
19. 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, Vol. 19, No. 4, pp. 223–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.
20. 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, Vol. 38, No. 3, pp. 580–583 (in Russian), DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583.
21. 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).
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Vasilchenko A. A. (2022a), 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, Vol. 19, No. 4, pp. 207–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
26. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N. (2022b), Burned areas dynamics in zonal landscapes of the South-East of The European part of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 1, pp. 122–133 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010113.

27. Begimova M., Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 227, Art. No. 02004, DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
28. Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastri C., Rindinella A., Corona P., Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 47, pp. 60–68, DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.005.
29. Dronova I., Kislik C., Dinh Z., Kelly M.A., Review of Unoccupied Aerial Vehicle Use in Wetland Applications: Emerging Opportunities in Approach, Technology, and Data, *Drones*, 2021, Vol. 5, No. 4, Art. No. 45, DOI: 10.3390/drones5020045.
30. 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.
31. Koshelev A.V., Tkachenko N.A., Shatrovskaya M.O., Decoding of forest belts using satellite images, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 875, Art. No. 012065, DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
32. Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P., A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery, *Forests*, 2013, Vol. 4, No. 4, pp. 922–944, DOI: 10.3390/f4040922.
33. 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, <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
34. Nasiri V., Darvishsefat A.A., Arefi H., Griess V.C., Sadeghi S.M.M., Borz S.A., Modeling Forest Canopy Cover: A Synergistic Use of Sentinel-2, Aerial Photogrammetry Data, and Machine Learning, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 6, Art. No. 1453, DOI: 10.3390/rs14061453.
35. Navarro A., Young M., Allan B., Carnell P., Macreadle P., The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate aboveground biomass of mangrove ecosystems, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 242, Art. No. 111747, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111747.
36. Pilas I., Gašparovic M., Novkinic A., Klobucar D., Mapping of the Canopy Openings in Mixed Beech–Fir Forest at Sentinel-2 Subpixel Level Using UAV and Machine Learning Approach, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 3925, DOI: 10.3390/rs12233925.
37. Yang X., Li F., Fan W., Liu G., Yu Y., Evaluating the efficiency of wind protection by windbreaks based on remote sensing and geographic information systems, *Agroforestry Systems*, 2021, Vol. 95, pp. 353–365, DOI: 10.1007/s10457-021-00594-x.
38. Yu T., Ni W., Zhang Z., Liu Q., Sun G., Regional Sampling of Forest Canopy Covers Using UAV Visible Stereoscopic Imagery for Assessment of Satellite-Based Products in Northeast China, *J. Remote Sensing*, 2022, Vol. 2022, Art. No. 9806802, DOI: 10.34133/2022/9806802.