

Анализ влияния почвенно-климатических условий на сохранность государственных защитных лесных полос на основе данных Sentinel-2

А. А. Выприцкий¹, С. С. Шинкаренко²

¹ *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: vyprickiy-a@vfanc.ru

Государственные защитные лесные полосы (ГЗЛП) создавались 50–70 лет назад для противодействия процессам деградации агроландшафтов, улучшения микроклиматических условий, повышения урожайности и биоразнообразия. Всего было создано восемь ГЗЛП, пять из которых пролегают через Волгоградскую обл. Данный регион расположен в достаточно контрастных условиях: почвенный покров сменяется от чернозёмов на севере региона до светло-каштановых и солонцов на юге и юго-востоке. Норма осадков, соответственно, снижается с 450 до 280 мм в год. Расположение Волгоградской обл. в таких разнообразных условиях делает её подходящим регионом для анализа влияния почвенно-климатических факторов на состояние различных компонентов агроландшафтов, включая полевые лесные насаждения и ГЗЛП. Цель данного исследования состоит в определении сохранности ГЗЛП Волгоградской обл. на основе спутниковых изображений Sentinel-2 и выявлении закономерностей влияния на неё климатических условий и почвенного покрова. Большинство существующих исследований ГЗЛП используют натурные методы, всеобъемлющий мониторинг ГЗЛП в пределах региона по материалам дистанционного зондирования не проводился. Высокое пространственное разрешение Sentinel-2 (10 м/пиксель) позволило выделить покрытую лесом площадь внутри проектных границ ГЗЛП на основе использования экспертного порога значений NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) в конце лета — начале осени, когда облиственные деревья имеют значительно большие значения данного вегетационного индекса в сравнении с убранными полями и естественной травянистой растительностью. В результате работ выделено 23,4 тыс. га проектной площади ГЗЛП, в том числе 21,3 тыс. га участков ГЗЛП с сомкнутостью полога более 0,3. Эта величина соответствует материалам официальной статистики. Подтверждено ухудшение состояния насаждений ГЗЛП по мере продвижения на юг от зоны чернозёмов до светло-каштановых почв. Установлена сильная связь сохранности ГЗЛП с гидротермическими условиями: для среднегодовой суммарной суммы осадков $R = 0,79$, для среднегодовой температуры $R = -0,69$. Связь сохранности ГЗЛП аппроксимируется логистической функцией с $R^2 = 0,74$. В условиях, когда норма осадков меньше 400 мм в год, сохранность ГЗЛП не превышает 70 %, при сумме осадков менее 360 мм в год насаждения практически полностью распадаются. Полученные картографические материалы могут использоваться для планирования и оптимизации лесотехнических мероприятий по уходу и созданию новых насаждений ГЗЛП.

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

Одобрена к печати: 18.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163

Введение

Государственные защитные лесные полосы (ГЗЛП) создавались по Постановлению Совета Министров СССР и ЦП ВКП(б) от 20 октября 1948 г. «О плане полезащитных лесонасаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоёмов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах Европейской части СССР», который известен как «Сталинский план преобразования природы». Всего планировалось создать восемь ГЗЛП общей площадью около 120 тыс. га, пять из которых пролегают через Волгоградскую обл. (Засоба и др., 2019).

Защитные лесные насаждения, в том числе и ГЗЛП, являются средообразующими для агроландшафтов, способствуют снижению интенсивности водной и ветровой эрозии, увеличению влажности почв и урожаев сельскохозяйственных культур, улучшают микроклимат, повышают биоразнообразие, связывают углерод, препятствуют заносу снегом прилегающих дорог (Агролесомелиорация..., 2006; Антонов, 2020; Национальный..., 2019; Рулев и др., 2014; Rulev, Pugacheva, 2019). В настоящее время преобладающую часть ГЗЛП составляют насаждения возраста 55–70 лет. Большая часть ГЗЛП относится к Государственному лесному фонду, но их инвентаризация проводится довольно редко, поэтому требуется актуализация сведений об их состоянии.

Волгоградская обл. расположена в достаточно контрастных природно-климатических условиях, здесь представлены почвы от обыкновенных чернозёмов на северо-западе региона до светло-каштановых в комплексе с солонцами на юге и юго-востоке. Норма осадков изменяется от 450 мм в Урюпинске до 280 мм на юге Заволжья. В Волгоградской обл. расположены три водораздельные ГЗЛП и две приречные. Значительная часть древостоев ГЗЛП региона находится в неудовлетворительном состоянии из-за достижения предельного возраста (Манаенков, Костин, 2007, 2009), неблагоприятных для лесных культур условий и регулярных пожаров (Шинкаренко, Берденгалиева, 2019; Шинкаренко и др., 2022б). По этим причинам данный регион очень хорошо подходит для анализа сохранности ГЗЛП в различных почвенно-климатических условиях. Большая протяжённость ГЗЛП делает наземные исследования их состояния очень трудоёмкими, поэтому использование с этой целью данных дистанционного зондирования оправдано (Чеплянский и др., 2022).

Данные дистанционного зондирования различного пространственного разрешения широко применяются в лесном хозяйстве. Например, для лесных массивов разработаны технологии картографирования запаса стволовой древесины (Жарко и др., 2018), высоты и проективного покрытия крон древостоев (Барталев и др., 2022; Ховратович и др., 2019; Чимитдоржиев и др., 2018), ландшафтных пожаров и их последствий (Барталев и др., 2016; Лупян и др., 2017), ветровалов (Шихов, Дремин, 2021), зарастания древесной растительностью залежей (Терехин, 2020) и других задач. ГЗЛП представляют собой систему насаждений из 1–4 лент шириной от 60 до 100 м. По этим причинам для анализа их состояния по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требуются спутниковые изображения высокого пространственного разрешения. Большая часть существующих исследований состояния защитных лесных насаждений (ЗЛН) основывается на экспертном дешифрировании спутниковых данных сверхвысокого разрешения или материалах натурных исследований (Антонов, 2020; Нарожная, Чендев, 2020; Ткаченко, Кошелев, 2017; Турчин и др., 2021; Чеплянский и др., 2018; Koshelev et al., 2021; Smirnov et al., 2021; Vassilev et al., 2019). Эти методы оказываются очень трудоёмкими и не подходят для быстрой оценки состояния ЗЛН на больших площадях. Наличие в открытом доступе данных Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м делает возможным использование различных вегетационных индексов для определения сохранности ГЗЛП, ширина которых в несколько раз превышает линейные размеры пикселя изображения данного спутника (Шинкаренко и др., 2022а; Begimova, 2021). Использование данных Landsat разрешения 30 м может иметь меньшую точность по сравнению с Sentinel-2 из-за большего размера пикселя и ошибок на границах линейно-протяжённых ГЗЛП. По этой причине оценки, полученные на основе спутниковых изображений Landsat, могут иметь погрешность (Чеплянский и др., 2022).

Имеющиеся исследования состояния ГЗЛП опираются на полевые исследования (Турчин и др., 2021) либо на материалы государственной инвентаризации лесов, которые содержат сведения о состоянии выделов, но при этом отсутствуют в свободном доступе (Засоба и др., 2019; Чеплянский и др., 2018). Поэтому задача быстрого определения сохранности ГЗЛП по данным ДЗЗ представляется актуальной. Исследование (Чеплянский и др., 2022), выполненное с использованием спутниковых изображений Landsat, свидетельствует о перспективности использования данных разрешения до 30 м, но лишь частично охватывает только две ГЗЛП из пяти на территории Волгоградской обл.: приречную «Воронеж – Ростов-на-Дону» и водораздельную «Волгоград – Элиста – Черкесск».

Цель настоящего исследования заключается в анализе сохранности ГЗЛП в различных почвенно-климатических условиях на территории Волгоградской обл., а также выявлении связей состояния ГЗЛП и условий их функционирования. Для этого решались следующие задачи: картографирование проектных границ ГЗЛП по данным сверхвысокого разрешения, определение покрытой лесом площади внутри границ ГЗЛП и расчёт сохранности насаждений, выявление связей сохранности ГЗЛП и почвенно-климатических условий.

Объект, материалы и методы исследования

На территории Волгоградской обл. расположены три водораздельных ГЗЛП («Камышин – Волгоград» полностью, «Волгоград – Элиста – Черкесск» и «Пенза – Каменск» частично) и две приречных («Воронеж – Ростов-на-Дону» вдоль обоих берегов р. Дон и «Саратов – Астрахань» вдоль обоих берегов р. Волги) (табл. 1, рис. 1).

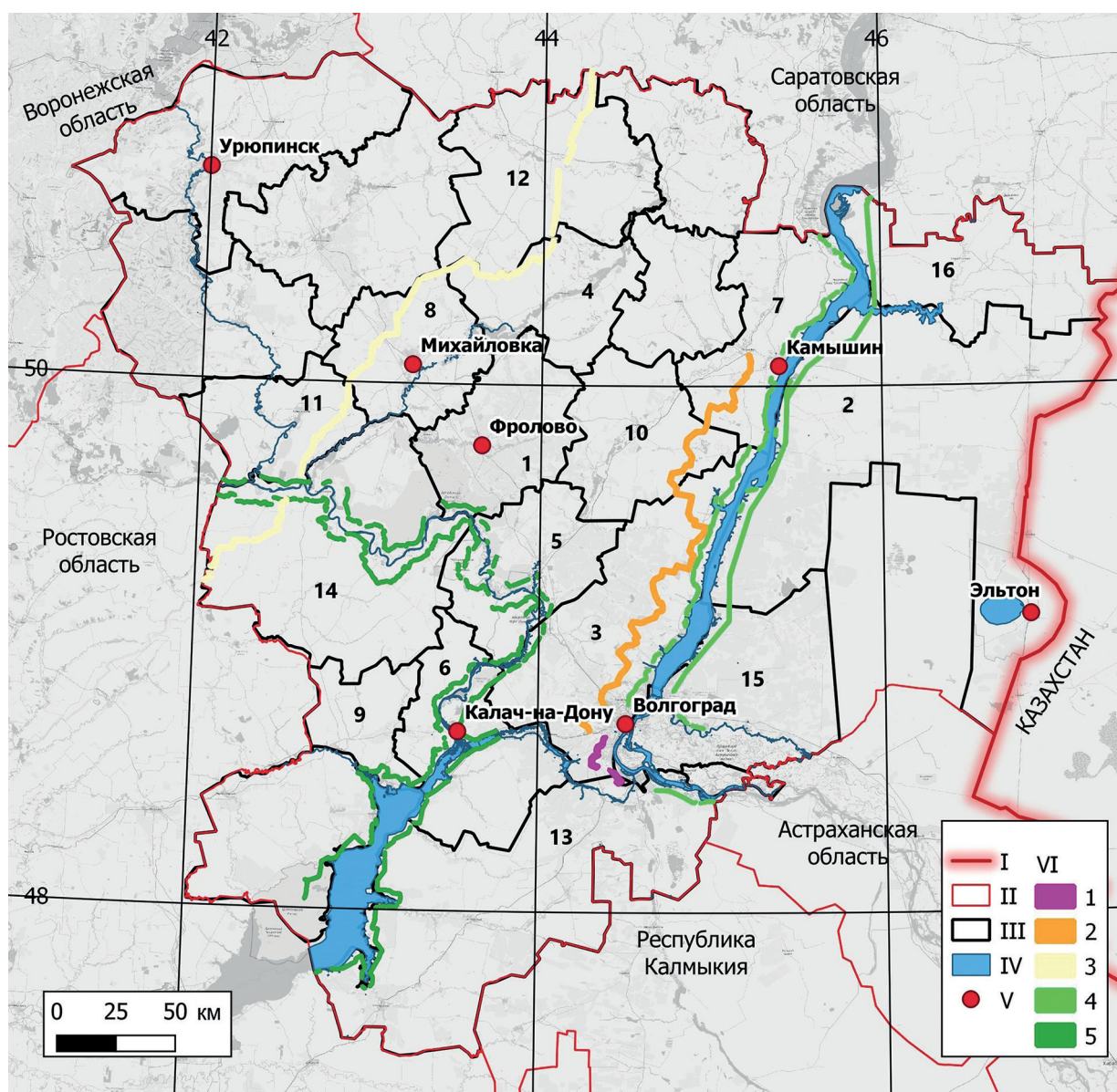


Рис. 1. Расположение ГЗЛП в Волгоградской обл.: I — государственная граница РФ; II — границы регионов; III — границы лесничеств, 1–16 — номера лесничеств (см. табл. 3); IV — водные объекты; V — населённые пункты; VI — ГЗЛП: 1 — «Волгоград – Элиста – Черкесск», 2 — «Камышин – Волгоград», 3 — «Пенза – Каменск», 4 — «Саратов – Астрахань», 5 — «Воронеж – Ростов-на-Дону»

Таблица 1. Проектные характеристики ГЗЛП, пролегающих через Волгоградскую обл. (Засоба и др., 2019; Rulev, Pugacheva, 2019), и площади указанных ГЗЛП в пределах региона

Название ГЗЛП	Ширина	Протяжённость, км	Площадь общая/площадь в регионе, тыс. га
<i>Приречные ГЗЛП</i>			
«Саратов – Астрахань»	Две ленты вдоль берегов Волги шириной по 100 м	900	9,39/4,86
«Воронеж – Ростов-на-Дону»	Две ленты вдоль берегов Дона шириной 60 м	920	8,40/4,22
<i>Водораздельные ГЗЛП</i>			
«Пенза – Каменск»	Три ленты по 60 м на расстоянии 300 м	600	11,62/5,75
«Камышин – Волгоград»	Три ленты по 60 м на расстоянии 300 м	170	5,76/5,7
«Волгоград – Элиста – Черкесск»	Четыре ленты по 60 м на расстоянии 300 м	570	7,74/0,71

Трассы ГЗЛП пролегают по территории 16 лесничеств, 25 районов области и Волгограду. Согласно Государственному лесному реестру, проектная площадь ГЗЛП на территории Волгоградской обл. составляет 21,2 тыс. га, из которых лесными насаждениями занято 19 тыс. га, что составляет 89,6 % (Чеплянский и др., 2018). Согласно лесному плану Волгоградской обл. (Лесной..., 2009), площадь ГЗЛП в регионе составляет 21,7 тыс. га, а по данным, предоставленным Комитетом природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области, из общей площади ГЗЛП (21,2 тыс. га) покрыто лесом 17,2 тыс. га (81 %). Преобладающими породами в составе ГЗЛП являются: дуб черешчатый, ясень зелёный, ясень обыкновенный, ясень пенсильванский, вяз приземистый, клён ясенелистный. Также встречаются кустарники: смородина золотистая, жимолость татарская, терн, карагана древовидная (Манаенков, Костин, 2007, 2009).

Определение сохранности ЗЛН основывается на выделении проектных границ и площади сохранившихся насаждений в их пределах (Агролесомелиорация..., 2006). Подразумевается, что, когда характеристики ЗЛН доходят до проектных, достигается предельная полнота насаждения, полог смыкается. Поэтому при анализе состояния ЗЛН по данным ДЗЗ можно поставить знак равенства между сохранностью и сомкнутостью (Рулев и др., 2014). Сохранность в этом случае определяется как отношение площади крон внутри проектных границ ЗЛН к величине проектной площади ЗЛН и может выражаться как в долях единицы, так и в процентах.

Проектные границы лесных полос обычно выделяют на основе данных сверхвысокого пространственного разрешения (например, с использованием сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth)) при помощи экспертного дешифрирования (Антонов, 2020; Нарожная, Чендев, 2020; Ткаченко, Кошелев, 2017; Koshelev et al., 2021). Для многолетнего мониторинга трудоёмкий процесс визуального дешифрирования границ ЗЛН оправдан, поскольку может быть выполнен один раз, а в дальнейшем необходимо определять только покрытую лесом площадь внутри этих границ. При этом могут использоваться как методы классификации данных сверхвысокого пространственного разрешения (Терехов и др., 2014) либо экспертный порог (Рулев и др., 2014), так и данные высокого пространственного разрешения от 10 до 30 м в зависимости от площади и линейных размеров ЗЛН, например Sentinel-2 (Шинкаренко и др., 2022a; Begimova, 2021) или Landsat (Чеплянский и др., 2022).

В данной работе проектные границы ГЗЛП выделялись на основе экспертного дешифрирования спутниковых изображений сверхвысокого пространственного разрешения Google Earth. Для уточнения пространственного положения выделов ГЗЛП использовались карты-схемы лесничеств Волгоградской обл. из приложений к документу (Лесной..., 2009), а также

публичная кадастровая карта (pkk.rosreestr.ru/). Большая часть водораздельных ГЗЛП отнесена к Государственному лесному фонду, что отражено на кадастровой карте. Приречные ГЗЛП частично находятся на землях сельскохозяйственного назначения или не имеют кадастровых границ, что может служить одной из причин различий полученных данных о площади ГЗЛП и официальных статистических сведений. Выделы с распавшимися или исчезнувшими насаждениями сохраняют достаточно чёткие дешифровочные признаки (форма, структура (борозды от обработки почв), минерализованные полосы вдоль границ), благодаря чему их можно выделить даже при низкой сомкнутости полога. Векторные контуры ГЗЛП были пересечены границами лесничеств Волгоградской обл., что позволило присвоить атрибут лесничества, на территории которого расположены насаждения.

Территория исследований подвержена регулярным ландшафтными пожарам, в том числе и на сельскохозяйственных землях (Шинкаренко и др., 2021). Поскольку цель настоящей работы заключается в определении влияния на состояние ГЗЛП только почвенно-климатических условий, то затронутые пожарами участки не анализировались. Для этого границы ГЗЛП пересекались контурами пожаров по данным публикаций (Шинкаренко, Берденгалиева, 2019; Шинкаренко и др., 2022б). Полученные объекты получили соответствующую отметку в атрибутивной информации и в будущем будут проанализированы отдельно с учётом продолжительности периода после пожаров, количества лет с пожарами и др.

Для выделения покрытой лесом площади использовались находящиеся в открытом доступе спутниковые изображения Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м, что значительно меньше ширины изучаемых ГЗЛП, составляющей 60–100 м. Для получения спутниковых данных Sentinel второго уровня обработки после радиометрической калибровки и коррекции атмосферных искажений (L2A — BOA, *англ.* Bottom of Atmosphere) использовался сервис «Вега-Science» (Лупян и др., 2015; Loupian et al., 2022).

Для лесостепной зоны установлено значимое снижение коэффициентов спектральной яркости в коротковолновом канале (SWIR — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный) при росте лесистости (Terekhin, 2021). Пространственное разрешение SWIR-каналов Sentinel-2 составляет 20 м, что хуже, чем в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Этот фактор представляется критичным при анализе ГЗЛП, ширина которых не превышает 60–100 м, по этой причине коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) SWIR-диапазонов не использовались в работе. Использование зимних спутниковых изображений при наличии снежного покрова в южных районах Волгоградской обл. затруднено из-за его неустойчивости и недостаточного количества безоблачных снимков. Поэтому бисезонный индекс леса BSFI (*англ.* Bi-season Forest Index), показавший хорошие результаты при картографировании ЗЛН (Шинкаренко и др., 2022а), не применялся.

Покрытая лесом площадь внутри границ ГЗЛП определялась на основе экспертного порога по значениям NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). Даты спутниковых снимков подбирались на период конца лета — начала осени, когда древесные насаждения, естественная травянистая растительность и поля с сельскохозяйственными культурами наиболее контрастны (Рулев и др., 2016; Шинкаренко, Барталев, 2020). Это связано с тем, что естественная растительность заканчивает вегетацию, яровые культуры либо убраны, либо находятся в последних фенологических фазах, а озимые культуры ещё не набрали фитомассу. Облиственные деревья по этой причине обладают значительно большими значениями NDVI по сравнению с окружающими сельскохозяйственными землями и естественными ландшафтами (Терехин, 2021). В дальнейшем возможны исследования по определению особенностей спектрально-отражательных характеристик выделов ГЗЛП разной сохранности по данным Sentinel-2, поскольку при повышении лесистости территории значения КСЯ снижаются (Терехин, 2022).

Тайлы Sentinel-2 и соответствующие даты съёмки для изученных ГЗЛП приведены в *табл. 2*. Из-за облачности получение необходимого количества спутниковых изображений за один год бывает затруднительным, поэтому использовались данные за несколько лет. Состояние ГЗЛП за 2–3 года меняется слабо, поэтому этот фактор не мог существенно повлиять на полученные результаты. Поскольку отдельные спутниковые изображения были

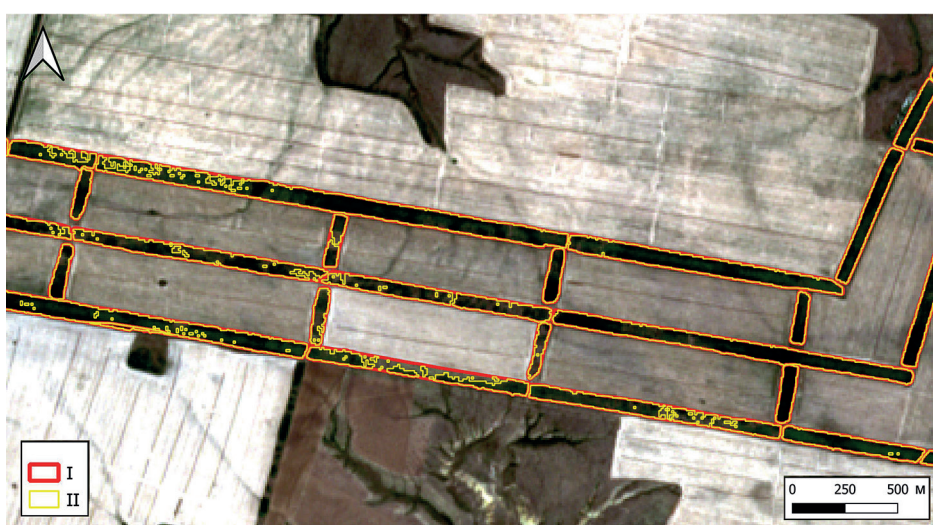
получены в разные годы, применяемый экспертный порог значений NDVI для древесно-кустарниковой растительности ГЗЛП подбирался отдельно для каждого тайла Sentinel-2. Контроль дешифрирования на основе использованных значений экспертного порога проводился с помощью спутниковых изображений сверхвысокого разрешения Google Earth. Полученные растровые маски покрытой лесом площади переводились в векторный формат, после чего обрезались границами ГЗЛП. Далее для каждого выдела ГЗЛП определялась площадь леса в его границах. Пример выделения границ ГЗЛП и лесной площади показан на *рис. 2*.

Таблица 2. Даты (тайлы) использованных снимков Sentinel-2A/B

Название ГЗЛП	Даты (тайлы) спутниковой съёмки
«Каменск – Пенза»	21.08.2018 (T38UMB), 05.09.2019 (T37UGQ, T38ULA, T38UMA)
«Саратов – Астрахань»	30.08.2021 (T38UMV, T38UNA, T38UNB), 09.09.2021 (T38UNV), 14.09.2021 (T38UMU)
«Камышин – Волгоград»	13.08.2019 (T38UMV), 23.08.2019 (T38UMA), 31.08.2019 (T38UNA)
«Волгоград – Элиста – Черкесск»	14.09.2021 (T38UMU)
«Воронеж – Ростов-на-Дону»	28.08.2021 (T37UGQ, T37UGR), 30.08.2021 (T38ULV), 09.09.2021 (T37UGP), 14.09.2021 (T38UMU, T38UMV)



а



б

Рис. 2. Пример выделения проектной (I) и покрытой лесом (II) площади ГЗЛП: а — «Пенза – Каменск», 50,41° с. ш., 43,35° в. д.; б — «Камышин – Волгоград», 49,298° с. ш., 44,75° в. д. Спутниковое изображение Sentinel-2 на 10.08.2022

Данные о почвах получены согласно карте (Почвенная..., 1989). Карта была отсканирована, географически привязана, после чего контуры были вручную векторизованы с заполнением таблицы атрибутов (подтип почв, комплексность, почвообразующая порода, мощность гумусового горизонта и др.). Каждому выделу ГЗЛП присваивались атрибуты пересекающего его контура почвенной карты. Площади ГЗЛП были сгруппированы по типам и комплексам почв: 1) светло-каштановые; 2) светло-каштановые с солонцами; 3) каштановые; 4) каштановые с солонцами; 5) тёмно-каштановые; 6) тёмно-каштановые с солонцами; 7) солонцы каштановые; 8) пески; 9) чернозёмы; 10) чернозёмы с солонцами; 11) прочее (аллювиальные, намытые и другие почвы). Распределение площади ГЗЛП по типам и подтипам почв описано в публикации (Выприцкий, 2021), поэтому в настоящей работе не приводится.

Климатические данные приводятся согласно глобальному информационному продукту CRU TS (*англ.* Climatic Research Unit Time-Series) пространственного разрешения 0,5°, содержащему сведения о месячных суммах осадков и среднемесячной температуре воздуха в каждой ячейке (Harris et al., 2020). Для каждой ячейки были определены среднеголетние показатели годовых сумм осадков и среднегодовой температуры за период 1980–2020 гг. После этого с помощью инструмента зональной статистики указанные значения были присвоены выделам ГЗЛП. Таким образом, векторный слой с границами ГЗЛП содержит следующий набор атрибутов: название ГЗЛП, тип почв, почвообразующая порода, лесничество, отметка о пожаре, норма годовой суммы осадков, норма среднегодовой температуры, площадь выдела, площадь леса внутри выдела, сохранность. Под выделами ГЗЛП в настоящей работе подразумеваются не лесотаксационные участки лесных кварталов, а части проектных границ ГЗЛП, расположенные в однородных почвенно-климатических условиях и отделённые от аналогичных смежных частей искусственными (дороги, просеки и т. п.) или естественными (реки, овраги, балки и т. п.) границами. Геоинформационная обработка данных осуществлялась в программе QGIS, статистический анализ выполнен в Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение

В результате картографирования проектной площади ГЗЛП всего выделено 23,4 тыс. га, что на 2,2 тыс. га превышает данные Комитета природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области. Это может быть связано с тем, что официальная статистика может не учитывать непокрытые лесом выделы ГЗЛП. Площадь ГЗЛП с пороговым значением сомкнутости 0,3 по данным ДЗЗ составила 21,3 тыс. га, что соответствует данным статистики. Сравнение площадей ГЗЛП, полученных в ходе настоящего исследования, и официальных данных по лесничествам Волгоградской обл. показано на *рис. 3* (см. с. 154). Покрытая лесом площадь по данным ДЗЗ составила 18,7 тыс. га, или 79,7 % площади ГЗЛП, что сопоставимо с данными статистики (81 % площади ГЗЛП).

По отдельным лесничествам прослеживается изменение состояния от практически полного распада насаждений (например, в Среднеахтубинском сохранность ГЗЛП всего 10,6 %) до хорошего состояния с сохранностью более 90 % (*табл. 3*). В целом распределение ЗЛН разной сохранности по лесничествам соответствует широтно-зональным закономерностям региона: в более северных лесничествах, в зоне чернозёмов и тёмно-каштановых почв, состояние древостоев значительно лучше, чем в южных, где преобладают находящиеся в неудовлетворительном состоянии насаждения.

Наибольшую сохранность имеют насаждения на чернозёмах и тёмно-каштановых почвах, хуже всего сохранились посадки на светло-каштановых почвах и солонцах (*рис. 4*, см. с. 155). Сохранность ГЗЛП «Волгоград – Элиста – Черкесск», расположенной полностью в зоне светло-каштановых почв, составляет всего 44,3 %, а ГЗЛП «Саратов – Астрахань», пролегающей вдоль берега Волги на почвах от тёмно-каштановых до светло-каштановых, равна 58,3 %. Данные тенденции подтверждаются и ранее проведёнными исследованиями: по мере продвижения с севера на юг состояние водораздельных ГЗЛП ухудшается. Например, на чернозёмах бонитет дубрав снижается с I–II до III–IV, а на каштановых — с III–IV до V (Манаенков, Костин, 2007, 2009). Исследования приречной ГЗЛП «Воронеж – Ростов-на-Дону» в пределах

Ростовской обл. также показали худшее состояние насаждений дуба на каштановых почвах по сравнению с чернозёмами и тёмно-каштановыми почвами (Турчин и др., 2021). Анализ состояния ГЗЛП «Воронеж – Ростов-на-Дону» и «Волгоград – Элиста – Черкесск», проведённый в работе (Чеплянский и др., 2022), выявил снижение сохранности с 92,3 % в зоне чернозёмов до 36,5 % на светло-каштановых солонцеватых почвах.

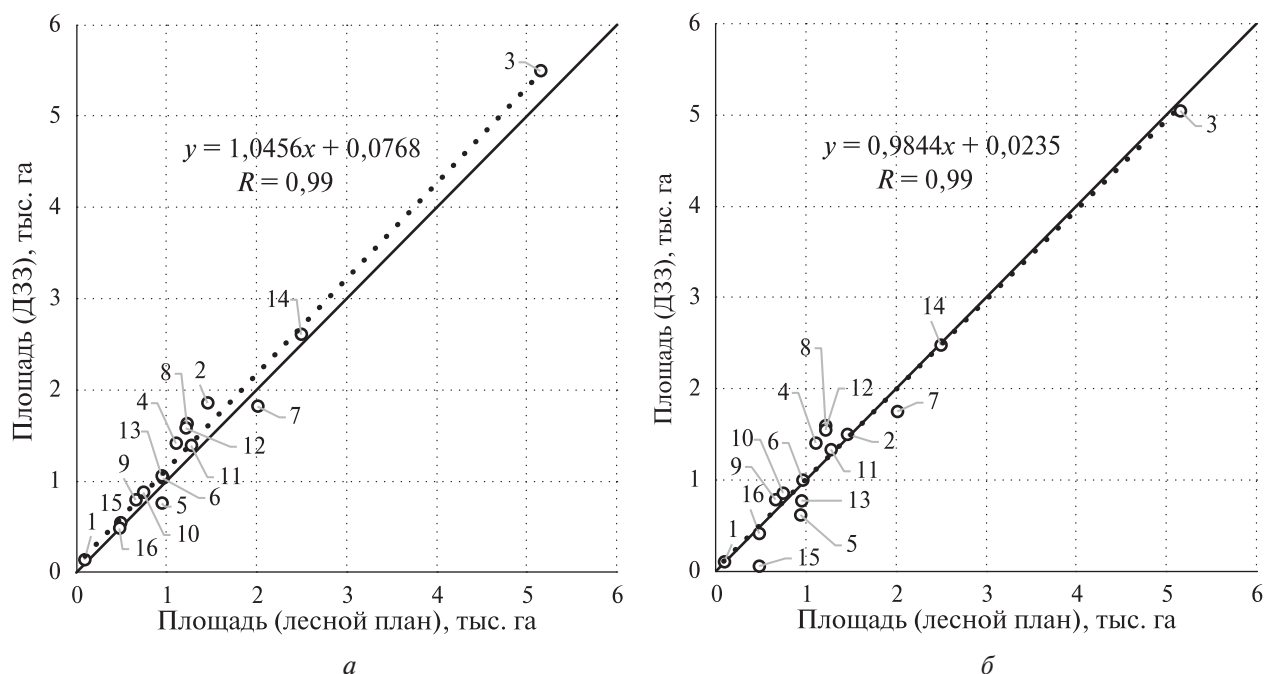


Рис. 3. Сопоставление площадей ГЗЛП по данным ДЗЗ и лесного плана Волгоградской обл.: а — все выделы по данным ДЗЗ; б — только выделы с сомкнутостью более 0,3 по данным ДЗЗ; 1–16 — номера лесничеств (см. табл. 3)

Таблица 3. Площади участков ГЗЛП разной сохранности

№	Лесничество	Площадь (га/%) / сохранность (%)				Средняя сохранность ГЗЛП, %
		0–30	30–50	50–70	70–100	
1	Арчединское	42/32	17/13	21/16	50/39	48,5
2	Быковское	409/22	399/22	338/18	708/38	56,6
3	Волгоградское	576/11	520/9	621/11	3757/69	74,9
4	Даниловское	0/0	0/0	10/1	1399/99	93,3
5	Иловлинское	140/19	26/4	56/7	530/70	71,0
6	Калачевское	58/6	15/1	66/6	896/87	82,6
7	Камышинское	77/4	36/2	24/1	1678/92	89,9
8	Михайловское	27/2	0/0	0/0	1597/98	90,6
9	Нижнечирское	10/1	13/2	112/14	662/83	81,6
10	Ольховское	23/3	11/1	13/1	822/95	92,7
11	Подтелковское	74/5	2/0	24/2	1285/93	86,8
12	Руднянское	0/0	0/0	3/0	1579/100	92,2
13	Светлоярское	296/28	103/10	137/13	514/49	54,4
14	Серафимовичское	144/5	68/3	131/5	2259/87	82,2
15	Среднеахтубинское	492/91	18/3	10/2	22/4	10,6
16	Старополтавское	80/17	17/3	29/6	354/74	74,7
Всего:		2451/9	1245/5	1595/7	18111/77	78,0

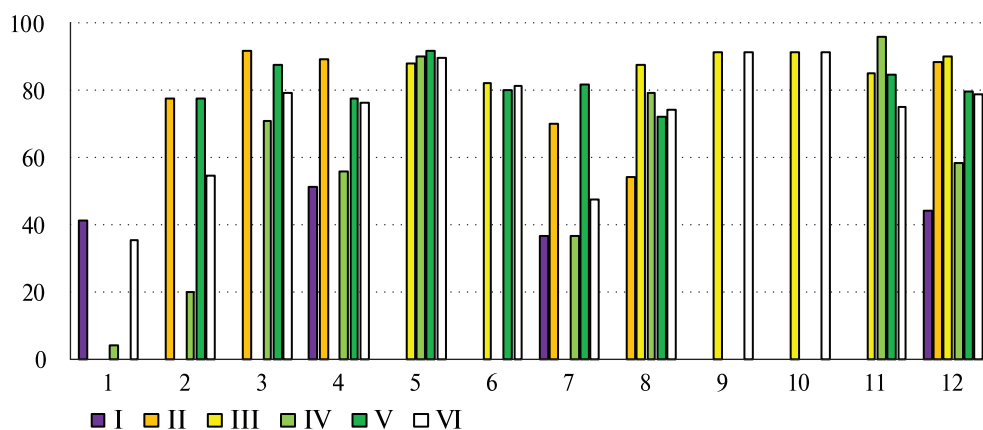


Рис. 4. Сохранность ГЗЛП на разных типах почв: I — «Волгоград–Элиста–Черкесск»; II — «Камышин–Волгоград»; III — «Пенза–Каменск»; IV — «Саратов–Астрахань»; V — «Воронеж–Ростов-на-Дону»; VI — все ГЗЛП. Типы и комплексы почв: 1 — светло-каштановые, 2 — светло-каштановые с солонцами, 3 — каштановые, 4 — каштановые с солонцами, 5 — тёмно-каштановые, 6 — тёмно-каштановые с солонцами, 7 — солонцы каштановые, 8 — пески, 9 — чернозёмы, 10 — чернозёмы с солонцами, 11 — прочие, 12 — вся площадь ГЗЛП

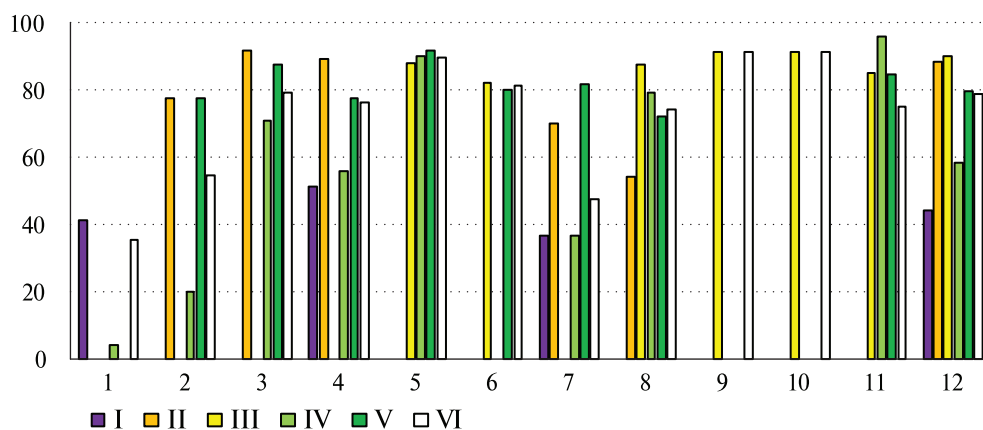


Рис. 5. Сохранность ГЗЛП в разных условиях увлажнения: I — «Волгоград–Элиста–Черкесск»; II — «Камышин–Волгоград»; III — «Пенза–Каменск»; IV — «Саратов–Астрахань»; V — «Воронеж–Ростов-на-Дону»; VI — все ГЗЛП

Большинство проведённых исследований состояния ГЗЛП опираются на данные о почвенном покрове, но практически не учитывают климатические факторы (например, (Турчин и др., 2021; Чеплянский и др., 2018, 2022)). Между тем, климат — один из ведущих факторов как почвообразования, так и динамики состояния растительности. Установлена значимая связь между высотой древостоев дуба черешчатого в водораздельных ГЗЛП и нормой годовых сумм осадков (Манаенков и др., 2013). По этим причинам анализ связи сохранности ЗЛН и климатических условий очень важен.

Насаждения ГЗЛП, которые находятся в лучших климатических условиях, в меньшей степени зависят от гидротермических условий (рис. 5, 6, см. с. 156). Так, ГЗЛП «Пенза–Каменск» в Волгоградской обл. расположена на территории, где норма осадков превышает 420 мм, а среднегодовая температура ниже 8,5 °С, что обеспечивает сохранность 90 %. Только один её участок находится в относительно худших условиях, при этом он был уничтожен пожаром. Для ГЗЛП «Воронеж–Ростов-на-Дону» характерны большие значения среднегодовой температуры, но условия увлажнения достаточно благоприятные — в среднем не менее 390 мм осадков в год, что позволило сохранить 78 % древостоев. Более низкая сохранность ГЗЛП «Воронеж–Ростов-на-Дону» по сравнению с «Пенза–Каменск» связана с расположением значительной части первой на песках, где она имеет заметно меньшую лесопокрываемую площадь (см. рис. 4).

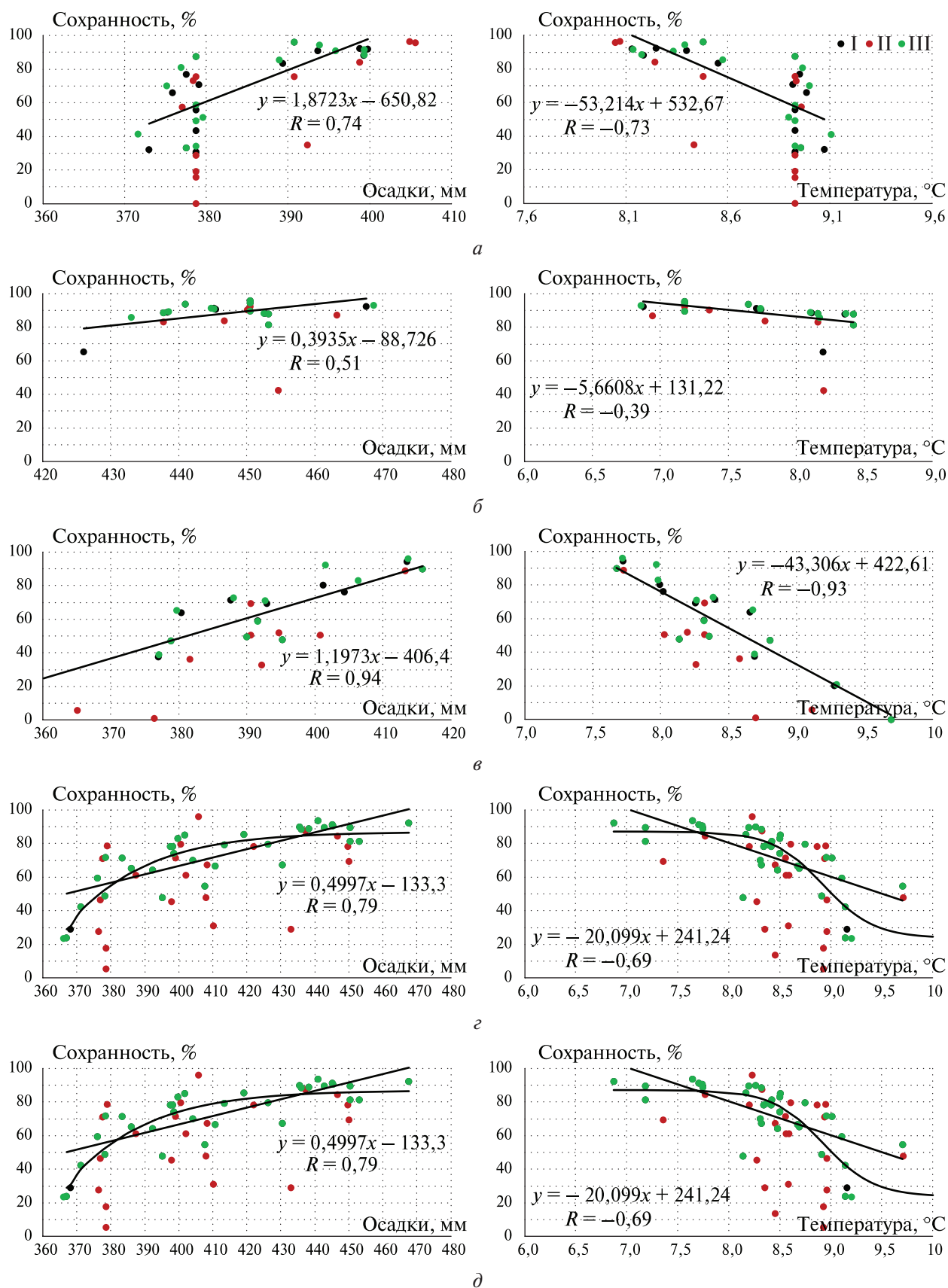


Рис. 6. Связь сохранности участков ГЗЛП на разных почвах с среднегодовыми годовыми суммами осадков (слева) и температурами (справа): *a* — «Камышин — Волгоград» и «Волгоград — Элиста — Черкесск»; *б* — «Пенза — Каменск»; *в* — «Саратов — Астрахань»; *г* — «Воронеж — Ростов-на-Дону»; *д* — все ГЗЛП (I — вся площадь ГЗЛП, II — только выгоревшие участки, III — только негоревшие участки)

На *рис. 6* представлены графики зависимости сохранности изученных ГЗЛП от средне-многолетних значений годовых сумм осадков и среднегодовой температуры. ГЗЛП «Камышин – Волгоград» и «Волгоград – Элиста – Черкесск» были объединены, поскольку вторая из них занимает в пределах Волгоградской обл. небольшую площадь (менее 1 % всех ГЗЛП региона) и полностью находится в тех же климатических условиях, что и первая. Кроме того, ГЗЛП «Волгоград – Элиста – Черкесск» является продолжением ГЗЛП «Камышин – Волгоград» южнее трассы Волгоград – Каменск Шахтинский и также протекает по водоразделу бассейнов Волги и Дона на Приволжской возвышенности. Поэтому далее анализируется сохранность этих ГЗЛП как одного объекта.

Расположенная в наиболее контрастных условиях ГЗЛП «Саратов – Астрахань» демонстрирует сильную связь сохранности и гидротермических условий: коэффициенты корреляции сохранности, годовых сумм осадков и среднегодовой температуры составляют 0,94 и –0,93 соответственно. Около 30 % данной ГЗЛП расположено в зоне светло-каштановых почв и солонцов с нормой осадков до 380 мм, сохранность этой части составляет 31 %. Также высокая значимая связь сохранности с увлажнением и температурой характерна для ГЗЛП «Волгоград – Элиста – Черкесск» и «Камышин – Волгоград»: $R = 0,74$ для осадков и $R = -0,73$ для температуры. Для всей площади ГЗЛП связь сохранности с суммами осадков несколько сильнее, чем с среднегодовой температурой (0,79 против –0,69). Зависимость сохранности насаждений ГЗЛП от условий увлажнения может быть аппроксимирована логистической функцией (см. *рис. 6д*):

$$P = \frac{417}{1 + \exp(-0,0484x + 15,9)} - 330,$$

где P — сохранность, %; x — среднемноголетняя величина годовой суммы осадков; $R^2 = 0,74$.

При норме осадков менее 400 мм в год сохранность не превышает 70 %. При норме осадков менее 360 мм в год сохранность насаждений приближается к нулю. Превышение нормы годовой суммы в 420 мм в год не привело к существенному улучшению сохранности ГЗЛП. Таким образом, использованные конструкции, породный состав и лесотехнические мероприятия для существующих ГЗЛП могут быть рекомендованы для зоны с увлажнением не менее 400–420 мм в год. Для более засушливой зоны необходимо проведение мероприятий по реконструкции и созданию ГЗЛП с учётом почвенно-климатических условий и последних рекомендаций в области создания ЗЛН и ухода за ними (Национальный..., 2019).

Использование NDVI в качестве индикатора для выделения покрытой лесом площади имеет ряд ограничений, поскольку служит только для отделения древесно-кустарниковой растительности от сельскохозяйственных культур и естественной травянистой растительности. Этот показатель значительно хуже для определения характеристик насаждений, таких как горизонтальная и вертикальная структура полога в сравнении с КСЯ в коротковолновом инфракрасном диапазоне (Терехин, 2022; Terekhin, 2021). Поэтому одним из направлений дальнейших исследований может быть определение закономерностей спектрального отклика выделов ГЗЛП с разной сохранностью, породным составом и другими лесотаксационными характеристиками.

Заключение

На основе экспертного дешифрирования спутниковых изображений сверхвысокого разрешения созданы векторные карты проектных границ ГЗЛП Волгоградской обл., включающие информацию о почвенно-климатических условиях и сохранности каждого выдела. Использованный метод выделения лесопокрытой площади внутри границ выделов на основе пороговых значений NDVI по данным Sentinel-2 в период конца лета – начала осени показал достаточную точность в сравнении с материалами официальной статистики. Преимуществом использования NDVI по данным Sentinel-2 выступает лучшее пространственное разрешение по сравнению с каналами коротковолнового инфракрасного диапазона, что критично для

картографирования узких и протяжённых лесных полос. Полученные картографические материалы позволяют оптимизировать планирование лесотехнических мероприятий по уходу за существующими древостоями и созданию насаждений на месте выпавших.

Общая сохранность ГЗЛП Волгоградской обл. составляет 79,7 %, что согласуется со статистическими данными (81 %). Однако официальные данные не учитывают около 2,2 тыс. га проектной площади ГЗЛП с сомкнутостью полога леса менее 0,3. Используемый метод не позволяет с достаточной точностью отделить древостои от кустарников и поросли, что также могло сказаться на результатах. Сохранность отдельных ГЗЛП изменяется от 45 % у «Волгоград – Элиста – Черкесск» в условиях светло-каштановых почв и солонцов до 90 % у «Пенза – Каменск» на чернозёмах и тёмно-каштановых почвах.

Установлена сильная положительная корреляционная связь сохранности вытянутых в широтном направлении и расположенных в контрастных климатических условиях ГЗЛП «Камышин – Волгоград», «Волгоград – Элиста – Черкесск» и «Саратов – Астрахань» с нормой годовой суммы осадков и умеренная отрицательная — со среднегодовой температурой воздуха. ГЗЛП «Воронеж – Ростов-на-Дону» и «Пенза – Каменск», целиком расположенные в зоне с нормой осадков более 380–400 мм, демонстрируют лучшую сохранность, независимую от изменений увлажнения в данных почвенно-климатических условиях.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение влияния пирогенного фактора на сохранность ГЗЛП, в том числе в зависимости от почвенно-климатических условий. Также необходима разработка методов определения таксационных характеристик насаждений по данным ДЗЗ: породного состава и высоты древостоев, запаса стволовой древесины и полноты. Для этого могут использоваться как вегетационные индексы, так и показатели КСЯ отдельных спектральных каналов.

Исследование выполнено в рамках темы научно-исследовательской работы ФНЦ агроэкологии РАН № 122020100311-3, в рамках государственных заданий ФНЦ агроэкологии РАН (№ 122101400030-6, 122101400027-6) и Института космических исследований РАН (регистрационный номер 122100700008-5) в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации № 2515-р от 2 сентября 2022 г. в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ

Литература

1. Агролесомелиорация. 5-е изд., перераб. и доп. / под. ред. акад. РАСХН А.Л. Иванова, К. Н. Кулика. 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. Геоинформац. 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. 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. Выприцкий А.А. Электронное картографирование государственных защитных лесных полос в Волгоградской области // Грани познания. 2021. № 3(74). С. 9–14.
6. 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.
7. 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.

8. Лесной план Волгоградской области на 2009–2018 годы. Утвержден постановлением Главы Администрации Волгоградской области № 144 от 11.02.2009. 211 с. URL: <https://oblkompriroda.volgograd.ru/upload/iblock/8c4/Lesnoy-plan-Volgogradskoy-oblasti.pdf>.
9. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
10. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
11. Манаенков А. С., Костин М. В. Современное состояние и возобновительный потенциал лесообразующих пород на обыкновенном черноземе // Лесное хозяйство. 2007. № 5. С. 26–28.
12. Манаенков А. С., Костин М. В. Состояние и перспектива возобновления защитных лесонасаждений на южном черноземе // Лесное хозяйство. 2009. № 3. С. 18–20.
13. Манаенков А. С., Костин М. В., Шкуринский В. А., Сурхаев Г. А., Лепеско В. В., Кладиев А. К., Узолин А. И., Зеленьяк А. К., Панов В. И., Петелько А. И. Методическое руководство по повышению долговечности широкополосных защитных лесных насаждений на юге европейской территории России. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2013. 56 с.
14. 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 междунаро. конф. М.: Изд-во Московского ун-та. 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 54–65. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65.
15. 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. М.: Изд-во МБА, 2019. Т. 2. 476 с.
16. Почвенная карта Волгоградской области. Киев: ПКО «Картография» ГУГК СССР, 1989. Масштаб 1:400 000.
17. Рулев А. С., Юферев 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.
18. Рулев А. С., Кошелева О. Ю., Шинкаренко С. С. Оценка лесистости агроландшафтов юга приволжской возвышенности по данным NDVI // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее образование. 2016. № 4(44). С. 24–32.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Ткаченко Н. А., Кошелев А. В. Картографирование защитной лесистости агроландшафтов волгоградского Заволжья // Вестн. АПК Ставрополя. 2017. № 2(26). С. 137–143.
24. Турчин Т. Я., Чеплянский И. Я., Ермолова А. С., Баканов И. А. Современное состояние насаждений государственной защитной лесной полосы «Воронеж – Ростов-на-Дону» в связи с типом культур и почвенными условиями // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 3(51). С. 41–58. DOI: 10.25686/2306-2827.2021.3.41.
25. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашицкий 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.
26. Чеплянский И. Я., Засоба В. В., Поповичев В. В. Лесные и нелесные земли в государственных защитных лесных полосах в России // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 51. С. 91–95.

27. *Чеплянский И. Я., Турчин Т. Я., Ермолова А. С.* Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2022. № 3. С. 44–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59.
28. *Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Кирбижекова И. И., Шерхоева А. А., Балтухаев А. К., Дагуров П. Н.* Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 9–24. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
29. *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.
30. *Шинкаренко С. С., Берденгалиева А. Н.* Анализ многолетней динамики степных пожаров в Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 98–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-98-110.
31. *Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н., Комарова И. А.* Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
32. *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.
33. *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.
34. *Шихов А. Н., Дремин Д. А.* Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 153–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168.
35. *Begimova M.* Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts // E3S Web Conf. 2021. V. 227. Art. No. 02004. 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
36. *Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. No. 7. Art. No. 109. 19 p. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
37. *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. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
38. *Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. 19 p. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
39. *Rulev A. S., Pugacheva A. M.* Formation of a New Agroforestry Paradigm // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. V. 89. No. 5. P. 495–501. DOI: 10.1134/S1019331619050071.
40. *Smirnov V. O., Zelentsova M. G., Krainyuk E. S.* Practical Application Peculiarities of Geo-Information Technologies While Planning the Protective Forest Belts // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 666. Art. No. 042005. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042005.
41. *Terekhin E. A.* Spatiotemporal Spectral-Response Assessment of the Forest Cover of Small Dry Valleys in the Central Russian Forest–Steppe // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 12. P. 1566–1575. DOI: 10.1134/S0001433821120215.
42. *Vassilev K. V., Assenov A. I., Velev N. I., Grigorov B. G., Borissova B. B.* Distribution, Characteristics and Ecological Role of Protective Forest Belts in Silistra Municipality, Northeastern Bulgaria // Ecologia Balcanica. 2019. V. 11. Iss. 1. P. 191–204.

Analysis of soil and climatic factors influence on the protective forest condition based on Sentinel-2 data

A. A. Vypritskiy¹, S. S. Shinkarenko²

¹ Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS
Volgograd 400062, Russia

² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vypritskiy-a@vfanc.ru

State protective forest belts were created 50–70 years ago to prevent the degradation of agricultural landscapes, to improve microclimatic conditions, and to increase productivity and biodiversity. A total of 8 forest belts were planted during that period, five of them being located in the Volgograd region. This region is characterized by rather contrasting conditions: the soil cover changes from chernozems in the north of the region to light chestnut soils and alkali soils in the south and southeast. The precipitation norm is correspondingly reduced from 450 to 280 mm per year. The location of the Volgograd region in such diverse conditions makes it a sample region for analyzing the influence of soil and climatic factors on various components of agrolandscapes, including shelter forest plantations and state protective forest belts. The purpose of this study is to determine the extent of forest belt preservation in the Volgograd region and to determine the patterns of influence of climatic conditions and soil cover on it on the basis of Sentinel-2 NDVI data. Most of the forest belt studies apply natural methods, while the comprehensive monitoring of the belts within the region based on remote sensing materials has not been carried out. In the course of the research, 23.4 thousand ha of the forest belt project area were recorded, including 21.3 thousand ha of forest belt plots with a canopy density of more than 0.3. This value corresponds to the materials of official statistics. The deterioration of the state of plantings was confirmed as we moved south from the zone of chernozems to light chestnut soils. A strong interdependence was established between the forest belt preservation and hydrothermal conditions: for the average annual precipitation $R = 0.79$, for the average annual temperatures $R = -0.69$. The connection of forest belt preservation is approximated by a logistic function with $R^2 = 0.74$. Under conditions when the precipitation norm is less than 400 mm per year, the forest belt preservation does not exceed 70 %. With a total precipitation of less than 360 mm per year, the plantations almost completely disintegrate. The obtained cartographic materials can be used for planning and optimization of forest engineering measures for the care and creation of new forest belts.

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

Accepted: 18.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163

References

1. *Agrolesomeliorsiya* (Agroforestry), A. L. Ivanov, A. K. Kulik (eds.), 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, *InterCarto. InterGIS. GI Support of Sustainable Development of Territories: Proc. Intern. Conf.*, Moscow: Moscow Univ. Press, 2020, Vol. 26, Part 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. (in Russian).
4. Bartalev S. A., Bogodukhov M. A., Zharko V. O., Sidorenkov V. M., Investigation of the possibilities of using ICESat-2 data to estimate the height of forests in Russia, *Sovremennyye 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. Vypritskiy A. A., Electronic mapping of state defensive forests in the Volgograd region, *Grani poznaniya*, 2021, No. 3(74), pp. 9–14 (in Russian).
6. 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, *Sovremennyye problemy*

- distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
7. 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).
8. *The Forest Plan of the Volgograd Region for 2009–2018. Approved by the Decree of the Head of the Administration of the Volgograd Region No. 144 dated February 11, 2009*, 211 p. (in Russian), available at: <https://oblkompriroda.volgograd.ru/upload/iblock/8c4/Lesnoy-plan-Volgogradskoy-oblasti.pdf>.
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 distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
10. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
11. Manaenkov A. S., Kostin M. V., Current state and renewal potential of forest-forming species on ordinary chernozem, *Lesnoe khozyaistvo*, 2007, No. 5, pp. 26–28 (in Russian).
12. Manaenkov A. S., Kostin M. V., Status and prospects for the renewal of protective forest plantations on the southern chernozem, *Lesnoe khozyaistvo*, 2009, No. 3, pp. 18–20 (in Russian).
13. Manaenkov A. S., Kostin M. V., Shkurinskiy V. A., Surkhaev G. A., Lepesko V. V., Kladiev A. K., Uzolin A. I., Zelenyak A. K., Panov V. I., Petelko A. I., *Metodicheskoe rukovodstvo po povysheniyu dolgovechnosti shirokopolosnykh zashchitnykh lesnykh nasazhdenii na yuge evropeiskoi territorii Rossii* (Methodical Guidance on the Durability of Broadband Protective Forest Plantations in the South of European Russia), Volgograd: VNIALMI, 2013, 56 p. (in Russian).
14. 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 Univ. Press, 2020, Vol. 26, Part 2, pp. 54–65 (In Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65.
15. *National report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructure, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)”*, 2019, Vol. 2, Moscow: Izd. MBA, 476 p. (in Russian).
16. *Pochvennaya karta Volgogradskoi oblasti* (Soil map of the Volgograd region), Kiev: PKO “Kartografiya”. GUGK SSSR, 1989, Scale 1:400 000 (in Russian).
17. 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).
18. 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).
19. 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 distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 142–156 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
20. 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 distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 111–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-111-122.
21. Terekhin E. A., Effect of abandoned agricultural lands forest cover on Sentinel-2 spectral response in forest-steppe natural zone, *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 223–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.
22. 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.
23. 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).
24. Turchin T. Ya., Cheplyanskii I. Ya., Ermolova A. S., Bakanov I. A., Current state of plantations of state forest shelter belt “Voronezh-Rostov-On-Don” in connection with the type of plantations and soil conditions, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2021, No. 3(51), pp. 41–58 (in Russian), DOI: 10.25686/2306-2827.2021.3.41.

25. 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.
26. Cheplyanskii I. Ya., Zasoba V. V., Popovichev V. V., Forest and not forest lands in the state protective forest strips in Russia, *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2018, No. 51, pp. 91–95 (in Russian).
27. Cheplyanskii I. Ya., Turchin T. Ya., Ermolova A. S., Remote monitoring of state forest shelterbelts in the steppe zone of European Russia, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi Zhurnal*, 2022, No. 3, pp. 44–59 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59.
28. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I., Sherkhoeva A. A., Baltukhaev A. K., Dagurov P. N., Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 9–24 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
29. 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.
30. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Analysis of steppe fires long-term dynamics in Volgograd Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 98–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-98-110.
31. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N., Komarova I. A., Dynamics of arid landscapes burning in Russia and adjacent territories based on active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 149–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
32. 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.
33. 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. Seriya geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 1, pp. 122–133 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010113.
34. Shikhov A. N., Dremin D. A., Patterns of wind-induced forest damage in the European Russia and Ural: analysis with satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 153–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168.
35. Begimova M., Climate indicators for forest landing and evaluation of forest shelterbelts, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 227, Art. No. 02004, 7 p., DOI: 10.1051/e3sconf/202122702004.
36. Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D., Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 2020, No. 7, Art. No. 109, 19 p., DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
37. 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, 9 p., DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012065.
38. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, 19 p., <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
39. Rulev A. S., Pugacheva A. M., Formation of a New Agroforestry Paradigm, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, Vol. 89, No. 5, pp. 495–501, DOI: 10.1134/S1019331619050071.
40. Smirnov V. O., Zelentsova M. G., Krainyuk E. S., Practical Application Peculiarities of Geo-Information Technologies While Planning the Protective Forest Belts, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 666, Art. No. 042005, DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042005.
41. Terekhin E. A., Spatiotemporal Spectral-Response Assessment of the Forest Cover of Small Dry Valleys in the Central Russian Forest–Steppe, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 12, pp. 1566–1575, DOI: 10.1134/S0001433821120215.
42. Vassilev K. V., Assenov A. I., Velev N. I., Grigorov B. G., Borissova B. B., Distribution, Characteristics and Ecological Role of Protective Forest Belts in Silistra Municipality, Northeastern Bulgaria, *Ecologia Balcanica*, 2019, Vol. 11, Issue 1, pp. 191–204.