

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАСТАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

© 2024 г. С. А. Лежнин¹*, А. В. Губаев¹, О. Н. Воробьев¹,
Э. А. Курбанов¹, Д. М. Дергунов¹

¹Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

*E-mail: lejninsa@volgatech.net

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.

В статье представлены результаты исследования зарастания земель запаса Среднего Поволжья методами дистанционного зондирования на примере Республики Марий Эл. Для исследования были использованы снимки спутника Landsat-8 OLI за летний период 2022 года в сочетании шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов, прошедшие процедуру трансформации доли минимальных “шумов” (Minimum noise fraction transform, MNF-трансформация). Результаты исследования показали, что в Республике наблюдается устойчивый процесс массового зарастания залежей древесно-кустарниковой растительностью. Площадь сельскохозяйственных угодий, по данным исследования, составила 763,69 тыс. га. Зарастание лиственными породами наблюдается на территории 135,5 тыс. га, что составляет 17,7% от общей площади сельскохозяйственных земель и 49,9% от территории залежных земель Республики Марий Эл. Зарастание земель хвойными насаждениями наблюдается на 26,7 тыс. га, что составляет 3,5% и 9,85% соответственно. В целом полученные данные, несмотря на некоторое снижение, свидетельствуют об устойчивом процессе захвата брошенных залежей молодняками древесных пород. Преобладающими породами, захватывающими земли залежей, являются лиственные породы, в основном береза и осина. Общая точность полученной тематической карты составила 79,7%, а коэффициент Каппа равен 0,79, что говорит о высокой согласованности тематической карты натурным данным.

Ключевые слова: залежь, MNF-трансформация, тематические карты, дистанционное зондирование, Landsat-8 OLI

DOI: 10.31857/S0205961424020034, EDN: FPAУKM

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная и оперативная информация о состоянии сельскохозяйственных земель федеральных органов власти, органов субъектов РФ и органов местного самоуправления является важным элементом рационального и эффективного использования этих земель. Начиная с середины 1990-х, многие сельскохозяйственные земли в различных регионах Российской Федерации перестали обрабатываться, что привело к масштабному увеличению площади залежей. Главным фактором, который повлиял на увеличение доли неиспользуемых сельскохозяйственных угодий, стал раздел единого комплекса на имущественные и земельные зоны, что явилось итогом реорганизации коллективных хозяйств в постсоветское время (Ерусалимский, 2011). Из-за данного процесса появилось значительное количество невостребованных земельных участков, которые выбыли

из сельскохозяйственного оборота. Согласно Докладу о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году (Доклад о состоянии..., 2019) количество невостребованных участков составило 1,5 млн ед., общей площадью 14,2 млн га (43,4% всех неиспользуемых сельскохозяйственных угодий РФ). В целом, площадь заброшенных в сельском хозяйстве земель (залежей) составляет 44,93 млн га или 11,8% общей площади сельскохозяйственных угодий в стране. Наихудшая ситуация сложилась на северо-западе европейской части России. Общая доля залежей там превышает 20% (в отдельных областях, таких как Архангельская, этот показатель превышает 70%). Тогда как в Приволжье и на Урале средняя доля неиспользуемых сельскохозяйственных земель составляет около 14%.

В Республике Марий Эл количество сельхозугодий, вышедших из оборота, по официальной

статистике составляет 271,3 тыс. га, что занимает 35% от общей их площади (Доклад о состоянии..., 2018). Отсутствие полноценной картографической базы не дает возможности для постоянного мониторинга этих земель, поэтому разработка новых современных технологий мониторинга на больших территориях с минимальными финансовыми затратами является актуальной задачей.

Неиспользование сельскохозяйственных угодий по их прямому назначению характерно не только для Российской Федерации, но и для многих стран Европы (Levers et al., 2018). Исследования нескольких групп ученых показали, что увеличение количества залежей в основном происходит в малопродуктивных и горных участках, а также районах, где распространена эрозия почвы или другие неблагоприятные условия (Koleska et al., 2016; Song, 2019). Возвращение заброшенных участков в оборот — это один из главных факторов возможного увеличения экспорта и производства сельскохозяйственной продукции. Но лимитирующим фактором данного явления выступает стоимость возврата залежей под использование. В зависимости от состояния залежи и от наличия на ней возобновления древесно-кустарниковой растительности финансовые затраты могут составлять от 20 до 200 тыс. руб./га в зависимости от региональных и климатических особенностей (Кирейчева и др., 2021).

Даже кратковременная приостановка сельскохозяйственных работ по культивированию почв приводит к тому, что такие земли начинают зарастать древесно-кустарниковой растительностью. Согласно некоторым исследованиям, лесовозобновление на залежах зависит от площади и расположения бывшего поля и последующего использования заброшенной пашни. При размерах участка до 10 га плотность возобновления может составлять до 5–8 тыс. на 1 га (Беляев и др., 2013; Лежнин, 2019). Если же размер участка увеличивается до 20–25 га, то плотность возобновления снижается до 1,5–2 тыс. на 1 га. При этом, на территории Среднего Поволжья в основном формируются березовые либо смешанные насаждения с преобладанием березы и сосны, что зависит от предыдущего использования земель (Курбанов и др., 2012). Если возобновление произошло непосредственно на заброшенной пашне, то чаще всего там произрастают сосновые молодняки с примесью березы и осины. Если же после пашни на участке были сенокосы либо пастбища, то она зарастает лиственными породами.

Несмотря на то, что многие страны в последнее время ставят мониторинг заброшенных земель в приоритет (Alcantara et al., 2012; Pedersen et al., 2023; Fradette et al., 2021; Norden et al., 2021; Löw et al., 2015), тем не менее согласованные карты залеж-

ных земель практически отсутствуют, как и общепринятые подходы, по оценке подобных участков. Традиционное наземное картографирование заброшенных сельскохозяйственных участков занимает значительное количество времени и требует большое количество средств. В этом контексте применение спутниковых снимков оказывается более эффективным источником данных.

Результаты большого количества исследований показали, что лесовозобновление на заброшенных сельскохозяйственных землях может быть выделено с помощью данных дистанционного зондирования Земли с точностью выше 70% (Alcantara et al., 2012; Janus et al., 2021; Liu, Song, 2023). Более высокая точность достигается, когда в моделях используются сцены спутниковых снимков, сделанные на период начала вегетации (Grădinaş et al., 2017). Распознавание лесовозобновления на залежах — более трудоемкий процесс по сравнению с картографированием других видов землепользования. К примеру, наличие рядом лесопитомников, парков или садовых участков негативно влияет на точность картографирования (Стыценко, 2017; Wittke et al., 2019). Если период нахождения земель под залежами небольшой, то они легко путаются с затяжным севооборотом (Pointereau et al., 2008). Использование разновременных спутниковых снимков с длительным периодом наблюдения (8–10 лет и более) приводит к тому, что заброшенными считаются только участки, где сукцессия уже перешла в стадию древесной растительности (Liu et al., 2014; Estel et al., 2015). В идеале карты заброшенных сельскохозяйственных земель должны быть основаны на долгосрочных временных рядах спутниковых снимков с частыми наблюдениями.

Ключевой особенностью снимков, которая может ограничить их использование для картографирования заброшенных пахотных земель, является низкое пространственное разрешение. Спутники грубого разрешения (>250 м), такие как AVHRR, SPOT-Vegetation или MODIS, важны для картографирования пахотных земель из-за их высокого временного разрешения и глобального охвата (Friedl et al., 2002), но малоприменимы для картографирования локальных участков. Изображения среднего разрешения, например, Landsat-8 OLI или Sentinel-2, позволяют контролировать пахотные земли в более крупном масштабе (Thenkabail et al., 2012; Defourny et al., 2019).

Предыдущие карты заброшенных пахотных земель на основе данных среднего разрешения в основном сосредотачиваются на небольших масштабах и ограниченных периодах времени (Parés-Ramos et al., 2008; Grădinaş et al., 2019) из-за сложности их эффективного использования. Кроме того, опреде-

ленную сложность для построения карт залежных земель на больших территориях представляет отсутствие данных, которые можно использовать в качестве обучающей выборки при классификации (Gomez et al., 2016). Такой набор данных привязан к спектральной отражательной способности объектов. Однако спектральные характеристики сельскохозяйственных угодий часто отличается от года к году, например, из-за изменения возделываемых культур или оставления пашни под пар, что добавляет сложности для построения обобщенного классификатора (Xu et al., 2018). Необходимо было бы собрать уникальный набор обучающих данных для каждого года, который должен быть классифицирован, что является очень трудоемким процессом для картографирования больших пространств.

В настоящее время существует две группы подходов для создания согласованных во времени карт наземного покрова:

1) Нормализация изображений для согласования спектральных характеристик одного и того же объекта на разновременных снимках (Pax-Lenney et al., 2001; Phalke, Ozdogan, 2018; Mainali et al., 2023);

2) Создание обучающей выборки для каждого временного периода на основе неизменных во времени классов (Fraser et al., 2009; Gray, Song, 2013).

Для картографирования заброшенных пахотных земель первый подход менее пригоден из-за сильных фенологических различий между годами и высокой внутриклассовой дисперсии, связанной с севооборотом или сменой возделываемых культур. Второй подход не требует нормализации снимков для учета фенологических различий, но требует наличие стабильного земного покрова в качестве набора обучения для ежегодной классификации (Dannenberget al., 2016).

Целью работы являлось создание тематической карты лесовозобновления на залежах Среднего Поволжья за период с 2011 по 2022 годы с использованием данных дистанционного зондирования.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

– собран обширный полевой материал для картографирования лесовозобновления на залежах и проверки точности полученных тематических карт;

– созданы тематические карты классов земной поверхности обследуемых участков;

– проведена оценка площадей молодняков леса (с разделением на хвойные и лиственные породы), произрастающих на залежах Республики Марий Эл, их расположения и доли от общей площади сельскохозяйственных земель.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для мониторинга лесовозобновления на залежах были подобраны тестовые участки, часть которых в дальнейшем использовалась в качестве опорной выборки для тематического картографирования исследуемых земель, а остаток – для проверки точности полученных тематических карт. Всего было заложено 206 тестовых участков, половина из которых были использованы при картографировании, а вторая половина – для проверки точности. Каждый тестовый участок был привязан к местности и добавлен в базу данных залежных земель Республики Марий Эл, созданную в программном комплексе ArcGIS10.8 (рис. 1).

Для мониторинга лесовозобновления на залежах были выбраны спутниковые снимки Landsat-8 OLI-8 за 2022 г., которые охватывают территорию исследования. Каждый снимок прошел процедуру выравнивания и трансформаций для устранения пространственных и атмосферных искажений. Для улучшения разделимости лесных и нелесных классов в работе использовались синтезированные изображения, включающие шестой (средний инфракрасный), пятый (ближний инфракрасный) и второй (синий) спектральные каналы Landsat-8 OLI. Комбинация данных спектральных каналов позволяет улучшить выделение сельскохозяйственных земель и провести оценку их состояния (Шихов и др., 2020). Всего было использовано 5 спутниковых снимков, полученных в летний период 2022 г. (табл. 1).

Для выделения породного состава молодняков на залежах подобранные снимки были преобразованы, т.к. спектральные характеристики хвойных и лиственных молодых деревьев на снимках Landsat-8 OLI практически не различимы. Для этого был использован один из способов анализа главных компонент (Principal Components Analysis, PCA), представляющий собой анализ много-спектральных коррелированных данных изучаемых объектов, трансформация доли минимальных “шумов” (Minimum noise fraction transform, MNF-трансформация). Этот метод был разработан

Таблица 1. Снимки спутника Landsat-8 OLI, используемые в исследовании.

Название снимка	Дата получения
LC08_L2SP_171020	25.08.2022
LC08_L2SP_171021	25.08.2022
LC09_L2SP_172020	24.08.2022
LC08_L2SP_172021	16.08.2022
LC09_L2SP_174020	22.08.2022

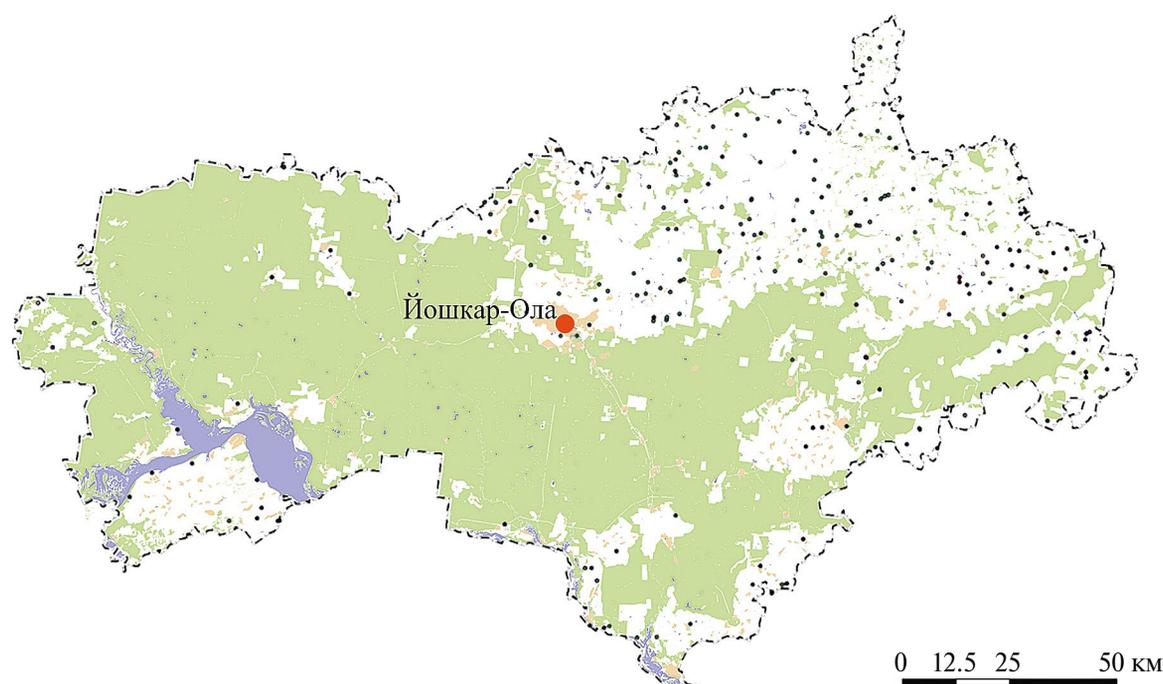


Рис. 1. Распределение тестовых участков по территории исследования.

американскими учеными (Boardman, Kruse, 1994) для разделения всех объектов на снимках на “чистые” и “шумовые классы”. К чистым классам относятся те объекты, которые можно явно выделить на изображении (например, лес, поле или водный объект), а к шумовым — объекты, которые находятся в пограничных спектральных значениях и могут перемешиваться с другими классами (например, лесовозобновление на залежах). Применение данного метода позволило как выделить лесовозобновление из сельскохозяйственных угодий, так и разделить его на хвойные и лиственные породы (рис. 2).

Перед началом работы на спутниковых изображениях территории исследования были исключены земли лесного фонда, земли крупных населенных пунктов и водные объекты. Оставшаяся площадь может быть условно отнесена к сельскохозяйственным землям.

Для создания тематических карт в исследовании использовался метод множественной неуправляемой классификации. При первой классификации изображения, прошедшие MNF-трансформацию, разделялись на 25 классов по методу ISODATA, после чего полученные классы распределялись в три группы: хвойных молодняков, лиственных молодняков и собственно сельскохозяйственные угодья. Если же отдельные тематические классы не могли быть идентифицированы с высокой точностью, они подвергались повторной переклассификации

с разделением изображения на 14 классов. Такой подход позволил с высокой точностью выделить все три изучаемых класса. Оценка точности полученной карты производилась построением матрицы различий (Confusion matrix) между натурными данными и данными тематической карты с определением коэффициента Каппа. Для мониторинга изменений состояния залежных земель проводилось сравнение с данными 2011 года, полученными в более ранних исследованиях (Лежнин, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом работы стала тематическая карта наземного покрова на территории сельскохозяйственных угодий Республики Марий Эл (рис. 3) с участками залежей, зарастающих хвойными и лиственными молодняками. В качестве сравнения была использована аналогичная карта за 2011 г. (рис. 4).

Как видно из рис. 3, значительная часть лесовозобновления на сельскохозяйственных землях расположена в северо-восточной части Республики Марий Эл на территории Оршанского, Сернурского и Новоторьяльского районов. Анализ тематической карты показал, что площадь сельскохозяйственных угодий составила 763,69 тыс. га, что хорошо согласуется с официальными данными (773,1 тыс. га).

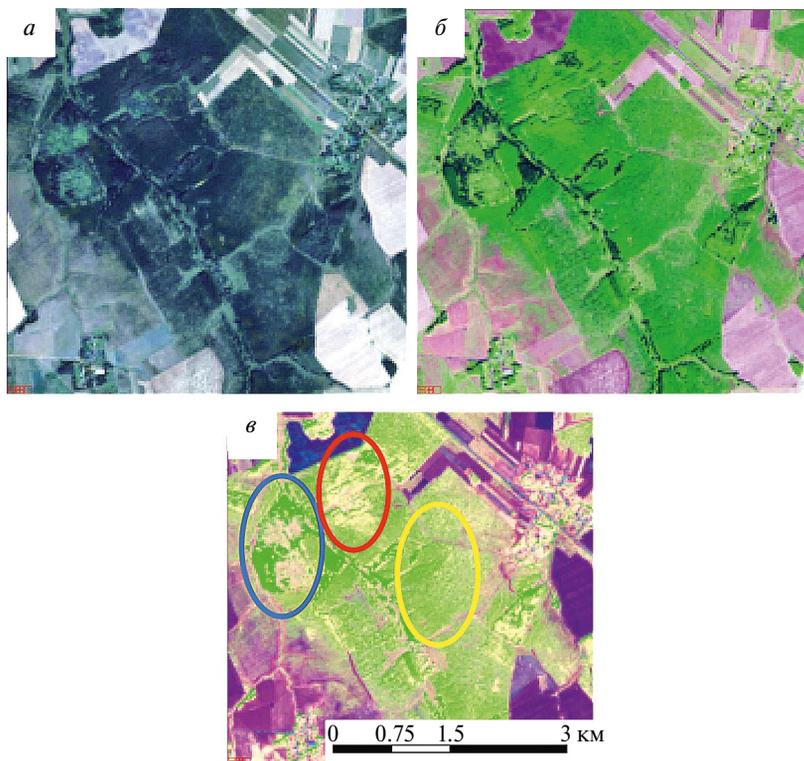


Рис. 2. Фрагмент снимка Landsat-8 OLI-8: *а* – в естественных цветах; *б* – после синтеза шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов; *в* – после проведения MNF-трансформации, на котором визуально выделяются спелый смешанный лес, входящий в лесной фонд (на изображении представлен темно-зеленым цветом, фрагмент леса выделен синим), лиственные молодняки на залежах (на изображении представлены оттенками желтого цвета, фрагмент их выделен красным цветом) и хвойные молодняки на залежах (на изображении представлены светло-зеленым цветом, фрагмент их выделен желтым цветом).

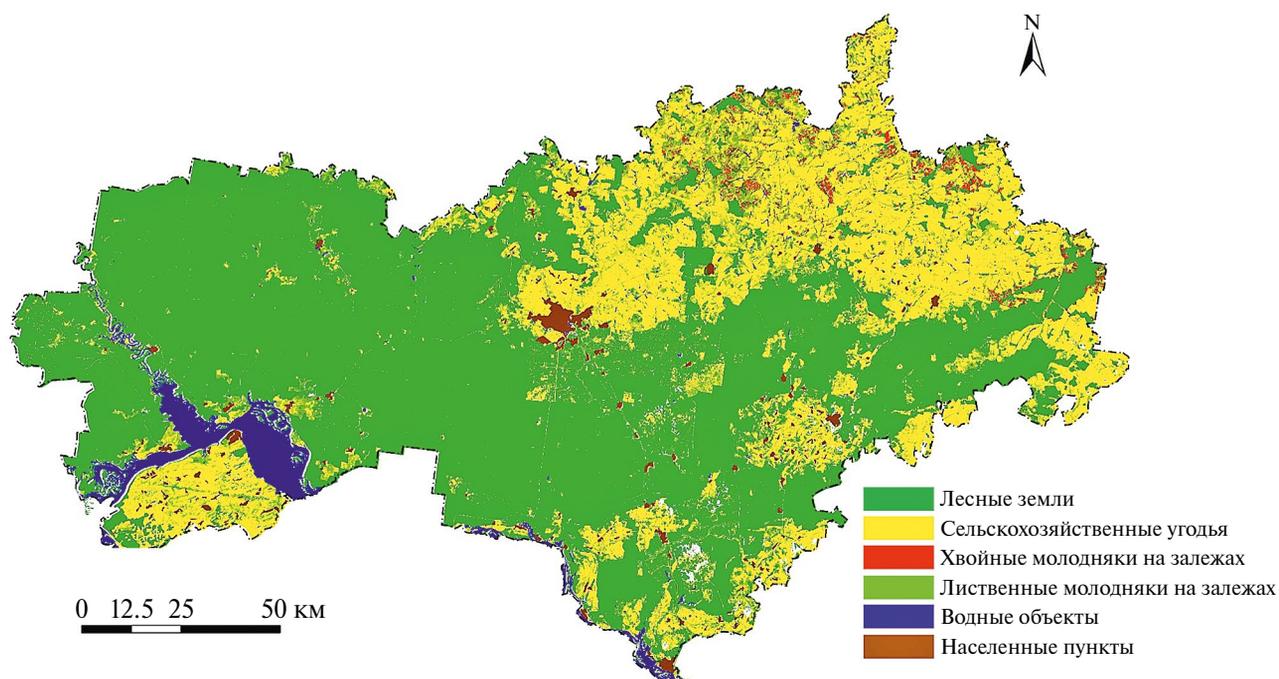


Рис. 3. Картограмма Республики Марий Эл за 2022 г. с выделенными участками молодых хвойных и лиственных пород на залежах.

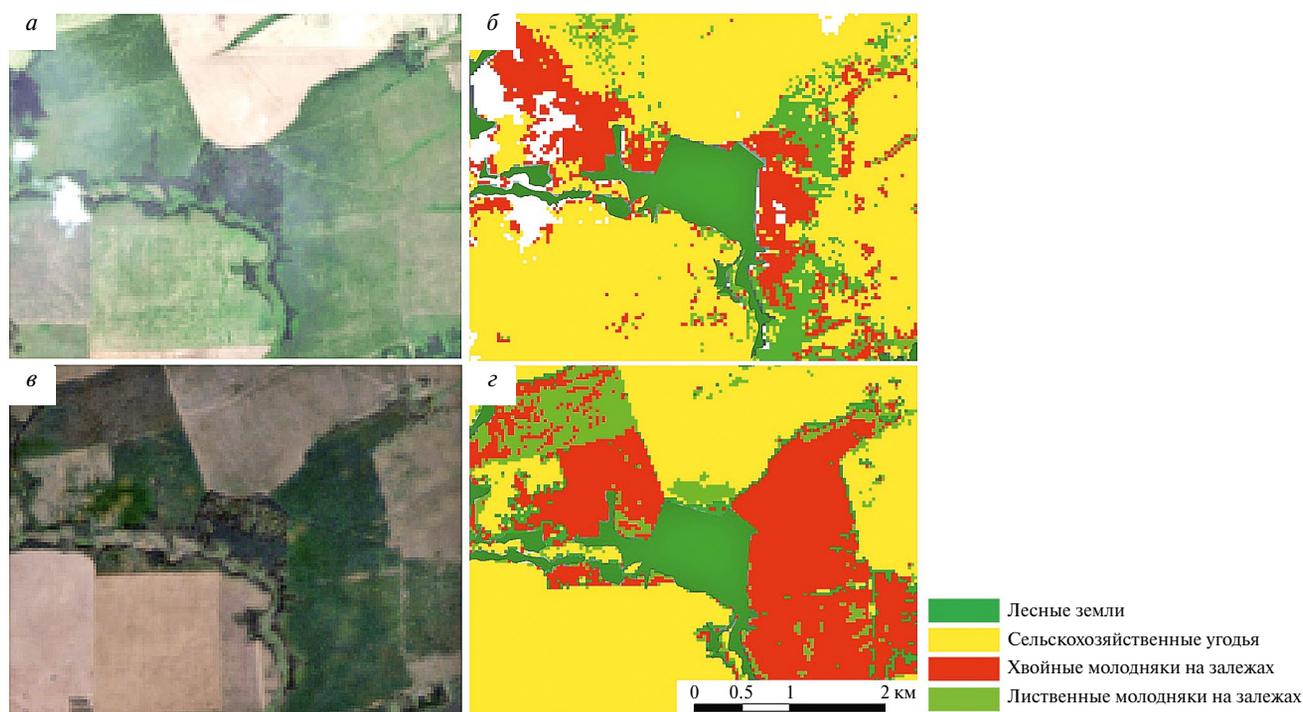


Рис. 4. Сравнение процессов зарастания залежей в 2011 и 2022 гг. на снимках Landsat и картосхемах 2011 и 2022 гг.: *а* – фрагмент снимка Landsat 7 ETM+ за 2011 г. в естественных цветах; *б* – фрагмент снимка Landsat 8 OLI за 2022 г. в естественных цветах; *в* – фрагмент картосхемы залежей с участками зарастания за 2011 г.; *г* – фрагмент картосхемы залежей с участками зарастания за 2022 г.

Лесовозобновление древесной растительностью из лиственных пород наблюдается на территории 135,5 тыс. га, что составляет 17.7% от общей площади сельскохозяйственных земель и 49.9% от территории залежных земель Республики Марий Эл. Лесовозобновление древесной растительностью из хвойных пород наблюдается на 26,7 тыс. га, что составляет 3.5% и 9.85% соответственно. Для сравнения, в 2011 году лиственное возобновление наблюдалось на территории 195.8 тыс. га (25.5% от сельхозземель), а хвойное – на территории 11.8 тыс. га (1.54% от сельхозземель) (табл. 2).

Как видно из этих данных, после первоначально-го с 2000-х годов бурного роста количества залежей, зарастающих древесно-кустарниковой растительностью, ситуация стабилизировалась и намечился незначительный спад. Снижение количества лиственного лесовозобновления на залежах объясня-

ется тем, что многие участки, ранее находившиеся в заброшенном состоянии, постепенно возвращаются в сельскохозяйственный оборот. Наиболее заметно это в Оршанском районе республики. Кроме того, молодняки лиственных пород более раннего возраста (на момент 2011 г. средний возраст лиственного возобновления на залежах составлял 10–12 лет), в отличие от хвойных, имеют близкие спектральные характеристики с травянистой растительностью на заброшенных пашнях, что внесло погрешность в тематическую карту 2011 г. Залежи с наличием хвойного лесовосстановления сложнее вернуть в сельскохозяйственный оборот, поэтому их численность за исследуемый период выросла более чем в два раза.

В целом полученные данные, несмотря на некоторое снижение, свидетельствуют об устойчивом процессе захвата брошенных залежей молодняками

Таблица 2. Площади молодняков древесных пород на залежах Республики Марий Эл за 2011 и 2022 гг.

	2011 г.	2022 г.	Разница
Площадь обрабатываемых сельскохозяйственных земель, га	594825.05	640234.8	45409.75
Площадь молодняков хвойных пород на залежах, га	11823.3	26745.57	14922.27
Площадь молодняков лиственных пород на залежах, га	195813.7	135481.68	–60332.02

Таблица 3. Матрица различий для оценки точности тематической карты 2022 г.

	С/х угодья	Лиственные молодняки	Хвойные молодняки	Итого
С/х угодья	48	4	2	54
Лиственные молодняки	6	24	0	30
Хвойные молодняки	1	1	15	17
Итого	55	29	17	101

древесных пород. Преобладающими породами, захватывающими земли залежей, являются лиственные породы, в основном береза и осина.

Созданная тематическая карта зарастающих залежей прошла проверку на точность методом матрицы различий (табл. 3) между значениями карты и проверочными тестовыми участками.

В вертикальных столбцах матрицы представлены фактические (эталонные) тестовые участки, а горизонтальные ряды включают в себя классы вновь созданной тематической карты. Значения по диагонали матрицы представляют собой число совпавших пикселей расчетных классов и фактических (эталонных) данных. Как видно из таблицы, общая точностью полученной тематической карты составила 86,1%, а коэффициент Каппа равен 0,76, что говорит о высокой согласованности тематической карты натурным данным. Наибольшая погрешность наблюдалась при выделении лиственных молодняков на заброшенных сельскохозяйственных угодьях. Полученные данные о количестве и площадях зарастания представляют практический интерес министерств лесного хозяйства и госкомимущества Республики Марий Эл, а также органов местного самоуправления при оценке и инвентаризации залежей.

ВЫВОДЫ

В ходе работы была создана цифровая база сельскохозяйственных земель с выделением залежных земель, зарастающих древесной растительностью, которая в дальнейшем может стать основой для их дальнейшего регулярного мониторинга.

Особенностью метода по выявлению и мониторингу лесовозобновления на заброшенных сельскохозяйственных землях является использование трансформации доли минимальных “шумов” (MNF-трансформации) снимков Landsat-8 OLI, синтезированных в сочетании шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов, как наиболее информативных при изучении сельскохозяйственных угодий. Применение трансформации

повысило точностью полученной тематической карты по сравнению с тематическим картографированием не трансформированных изображений.

Созданная тематическая карта сельскохозяйственных земель 2022 года свидетельствует о том, что на территории Республики Марий Эл идет устойчивый процесс массового зарастания залежей древесно-кустарниковой растительностью. Лесовозобновление древесной растительностью из лиственных пород наблюдается на территории 135,5 тыс. га, что составляет 17.7% от общей площади сельскохозяйственных земель и 49.9% от территории залежных земель Республики Марий Эл. Лесовозобновление древесной растительностью из хвойных пород наблюдается на 26,7 тыс. га, что составляет 3.5% и 9.85% соответственно. В целом, наблюдается небольшое снижение доли залежей, подвергшихся лесовозобновлению, однако следует учитывать, что с увеличением возраста подрост на полях их сложнее будет вернуть в сельскохозяйственный оборот и возможно лучшим решением будет передача их в земли лесного фонда, для чего нужно изменение законодательной базы РФ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-16-00094, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляев В.В., Кононов О.Д., Карaban А.А., Старицын В.В. Состояние древесной растительности на землях, выбывших из хозяйственного оборота в Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. 2013. Вып. 2. С. 5–11.

Доклад о состоянии и использовании земель в Республике Марий Эл в 2018 году. Электронный ресурс: <https://rosreestr.gov.ru/upload/to/respublika-mariy-el/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8B/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%202018%20%D0%A0%D0%9C%D0%AD.doc> (дата обращения 01.03.2023).

Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году.

- Электронный ресурс: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/fb1/fb12ab74bc70b5091b0533f44a4d8dba.pdf> (дата обращения 01.03.2023).
- Ерусалимский В.И. Лес и пашня // Лесное хозяйство. 2011. № 2. С. 14–15.
- Кирейчева Л.В., Шевченко В.А., Юрченко И.Ф. Оценка экономической эффективности ввода в агропроизводство залежных земель Нечерноземной зоны РФ // Московский экономический журнал. 2021. № 3. С. 245–255.
- Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Незамаев С.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat-8 OLI // Йошкар-Ола: Вестник ПГТУ, Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 3. С. 72–82.
- Лежнин С.А. Дистанционный метод оценки формирования молодняков на залежах Марийского лесного Заволжья по спутниковым снимкам // Дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола, 2013. 167 с.
- Лежнин С.А., Музурова Р.Л. Оценка вторичной сукцессии на залежах Республики Марий Эл // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной конференции. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. С. 126–135.
- Стыценок Е.А. Возможности распознавания сельскохозяйственных угодий с использованием методики совместной автоматизированной обработки разносезонных многозональных космических изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 172–183.
- Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие // Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2020. 191 с. Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchukperminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya kosmicheskikh-snimkov.pdf>
- Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C. Mapping abandoned agriculture with multitemporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 334–347.
- Boardman J.W. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing // Environmental Research Institute of Michigan. 1994. P. 407–418.
- Dannenbergh M.P., Hakkenberg C.R., Song C. Consistent classification of Landsat-8 OLI time series with an improved automatic adaptive signature generalization algorithm // Remote Sensing. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8080691>
- Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Hagolle O., Inglada J., Nicola L., Rabaute T., Savinaud M., Udroui C., Valero S., Bégué A., Dejoux J.-F., El Hariti A., Ezzaahar J., Kussul N., Labbassi K., Lebourgeois V., Miao Z., Newby T., Nyatugama A., Salh N., Shelestov A., Simonneaux V., Traore P.S., Traore S.S., Koetz B. Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world // Remote Sensing of Environment. 2019. № 221. P. 551–568. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.11.007>
- Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // Remote Sensing of Environment. 2015. № 163. P. 312–325. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2015.03.028>
- Fradette O., Marty C., Faubert P., Dessureault P.-L., Paré M., Bouchard S., Villeneuve C. Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modelling approach // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 499. 119565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>
- Fraser R.H., Oltho I., Pouliot D. Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks // Remote Sensing of Environment. 2009. № 113. P. 1397–1409. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.019>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.M. MODIS collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. № 114. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Gómez C., White J.C., Wulder M.A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: a review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. № 116. P. 55–72. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.03.008>
- Grădinaru S.R., Kienast F., Psomas A. Using multi-seasonal Landsat-8 OLI imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl // Ecological Indicators. 2019. Vol. 96, Pt. 2. P. 79–86.
- Gray J., Song C.H. Consistent classification of image time series with automatic adaptive signature generalization // Remote Sensing of Environment. 2013. № 134. P. 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.022>
- Janus J., Božek P., Mitka B., Tazsakowski J., Doróż A. Long-term forest cover and height changes on abandoned agricultural land: An assessment based on historical stereometric images and airborne laser scanning data // Ecological Indicators. 2021. Vol. 120. 106904. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106904>
- Kolecka N., Kozak J., Kaim D., Dobosz M., Ginzler C., Psomas A. Mapping secondary forest succession on abandoned agricultural land in the Polish Carpathians // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B8. P. 931–935.
- Levers C., Schneider M., Prishchepov A.V., Estel S. Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 644. P. 95–111.
- Liu J., Kuang W.H., Zhang Z.X., Xu X.L., Qin Y.W., Ning J., Zhou W.C., Zhang S.W., Li R.D., Yan C.Z., Wu S.X., Shi X.Z., Jiang N., Yu D.S., Pan X.Z., Chi W.F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s // Journal of Geographical Sciences. 2014. № 24. P. 195–210. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1082-6>
- Liu B., Song W. Mapping abandoned cropland using Within-Year Sentinel-2 time series // CATENA. 2023. Vol. 223. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106924>
- Löw F., Fliemann E., Abdullaev I., Conrad C., Lamers J.P.A. Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing // Applied Geography. 2015. Vol. 62. P. 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.009>
- Mainali K., Evans M., Saavedra D., Mills E., Madsen B., Minnemeyer S. Convolutional neural network for high-resolution wetland mapping with open data: Variable selection and the challenges of a generalizable model // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 861. 160622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160622>

- Nordén B., Olsen S.L., Haug S., Rusch G.* Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone – Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 489. 119045. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>
- Parés-Ramos I.K., Gould W.A., Aide T.M.* Agricultural abandonment, suburban growth, and forest expansion in Puerto Rico between 1991 and 2000 // *Ecology and Society*. 2008. № 13(8). <https://doi.org/10.5751/ES-02479-130201>
- Pax-Lenney M., Woodcock C.E., Macomber S.A., Gopal S., Song C.* Forest mapping with a generalized classifier and Landsat-8 OLI TM data // *Remote Sensing of Environment*. 2001. № 77. P. 241–250. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00208-5)
- Pedersen N.K., Schmidt I.K., Kepfer-Rojas S.* Drivers of tree colonization, species richness, and structural variation during the initial three decades of natural forest colonization in abandoned agricultural soils // *Forest Ecology and Management*. 2023. Vol. 543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121138>
- Phalke A.R., Özdoğan M.* Large area cropland extent mapping with Landsat-8 OLI data and a generalized classifier // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 219. P. 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.025>
- Pointereau P., Coulon F.P., Girard M.L., Stuczynski T., Ortega V.S., Del Rio A.* Analysis of farmland abandonment and the extent and location of agricultural areas that are actually abandoned or are in risk to be abandoned // *JRC Scientific and Technical Reports*. 2008 (EUR23411 EN).
- Song W.* Mapping Cropland Abandonment in Mountainous Areas Using an Annual Land-Use Trajectory Approach // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 1–24.
- Thenkabail P.S., Knox J.W., Ozdogan M., Gumma M.K., Congalton R.G., Zhuoting W.U., Milesi C., Finkral A., Marshall M., Marriotto I.* Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security: how can remote sensing help? // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2012. № 78(8). P. 773–782.
- Witke S., Xiaowei Y., Karjalainen M., Hyyppä J., Puttonen E.* Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 76. P. 167–178.
- Xu Y., Yu L., Zhao F.R., Cai X., Zhao J., Lu H., Gong P.* Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat-8 OLI images with a change detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa // *Remote Sensing of Environment*. 2018. № 218. P. 13–31. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.09.008>

Remote Monitoring of Reforestation on the Abandoned Agricultural Lands in the Republic of Mari El Using the Method of Principal Component Analysis

S. A. Lezhnin¹, A. V. Gubaev¹, O. N. Vorobev¹, E. A. Kurbanov¹, D. M. Dergunov¹

¹Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

The paper presents the results of monitoring natural forest regrowth on abandoned agricultural land in the Middle Volga Region using remote sensing methods. The Mari El Republic was chosen as the test site for this research. The use of modern remote sensing methods makes it possible to identify and evaluate areas of natural forest regrowth on abandoned agricultural lands with higher accuracy and at lower financial and labour costs. Minimum noise fraction transformed images (Landsat-8 OLI-8) were used in a combination of sixth (mid-infrared), fifth (near-infrared) and second (blue) spectral channels for the research. The findings revealed that there is a steady process of mass forest regrowth on abandoned agricultural land in Mari El. The total area of agricultural land used in the research was 763.69 thousand hectares. Reforestation with deciduous species is observed on a territory of 135.5 thousand hectares, which makes up 17.7% of the total area of agricultural land and 49.9% of the territory of fallow land in the Republic of Mari El. Reforestation with coniferous species is observed on 26.7 thousand hectares, which amounts to 3.5% and 9.85%, respectively. Future studies can address anthropogenic and natural impacts on the structure and dynamics of new forest stands. A comprehensive analysis of the density of forest regrowth on abandoned agricultural lands should be carried out using existing maps of agricultural land, population density, and other socio-economic factors.

Keywords: abandoned lands, MNF-transformation, thematic maps, remote sensing, Landsat-8 OLI

REFERENCES

- Belyaev V.V., Kononov O.D., Karaban A.A., Staritsyn V.V.* Sostoyanie drevesnoi rastitel'nosti na zemlyakh, vybyvshikh iz khozyaistvennogo oborota v Arkhangel'skoi oblasti [The state of woody vegetation on lands that have retired from economic circulation in the Arkhangel'sk region] // *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta*. 2013. Vyp. 2. P. 5–11. (In Russian).
- Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Respublike Marii El v 2018 godu [Report on the state and use of land in the Republic of Maria El in 2018]. Electronic resource: <https://rosreestr.gov.ru/upload/to/respublika-mariy-el/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8B/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%202018%20%D0%A0%D0%9C%D0%AD.doc> (01.03. 2023). (In Russian).
- Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskii Federatsii v 2019 godu [Report on the state and use of agricultural lands in the Russian Federation in 2019]. Electronic resource: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/fb1/fb12ab74bc70b5091b0533f44a4d8dba.pdf> (01.03.2023). (In Russian).

- Erusalimskii V.I.* Les i pashnya [Forest and arable land] // *Lesnoe khozyaistvo*. 2011. № 2. P. 14–15. (In Russian).
- Kireicheva L.V., Shevchenko V.A., Yurchenko I.F.* Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti vvoda v agroproduktstvo zaleznykh zemel' Nechernozemnoi zony RF [Evaluation of the economic efficiency of introducing fallow lands of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation into agricultural production] // *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*. 2021. № 3. P. 245–255. (In Russian).
- Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Nezamaev S.A., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A.* Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiya lesov Mariiskogo Zavolzh'ya po sputnikovym snimkam Landsat-8 OLI [Thematic mapping and stratification of the forests of the Mari Trans-Volga region based on Landsat-8 OLI satellite images] // *Ioshkar-Ola: Vestnik PGTU, Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2013. № 3. P. 72–82. (In Russian).
- Lezhnin S.A.* Dstantsionnyi metod otsenki formirovaniya molodnyakov na zalezkhakh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya po sputnikovym snimkam [A remote method for assessing the reforestation on the abandoned agricultural lands of the Mari forest Trans-Volga region using satellite images] // *Dis. ... kand. s.-kh. nauk. Ioshkar-Ola*. 2013. 167 p. (In Russian).
- Lezhnin S.A., Muzurova R.L.* Otsenka vtorichnoi suksessii na zalezkhakh Respubliki Marii El [Assessment of secondary succession on the deposits of the Republic of Mari El] // *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i dstantsionnyi monitoring: materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. Ioshkar-Ola: PGTU, 2019. P. 126–135. (In Russian).
- Stytsenko E.A.* Vozmozhnosti raspoznavaniya sel'skokhozyaistvennykh ugodii s ispol'zovaniem metodiki sovmestnoi avtomatizirovannoi obrabotki raznosezonnykh mnogoazonal'nykh kosmicheskikh izobrazhenii [Possibilities of recognition of agricultural lands using the method of joint automated processing of multi-seasonal multi-zone space images] // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. T. 14. № 5. P. 172–183. (In Russian).
- Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S.* Tematicheskoe deshifirovanie i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Elektronnyi resurs]: uchebnoe posobie [Thematic interpretation and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution] // *Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet*. 2020. 191 p. Rezhim dostupa: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchukperminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. (In Russian).
- Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C.* Mapping abandoned agriculture with multitemporal MODIS satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. P. 334–347.
- Boardman J.W.* Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in *Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing* // *Environmental Research Institute of Michigan*. 1994. P. 407–418.
- Dannenbergh M.P., Hakkenberg C.R., Song C.* Consistent classification of Landsat-8 OLI time series with an improved automatic adaptive signature generalization algorithm // *Remote Sensing*. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8080691>
- Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Hagolle O., Inglada J., Nicola L., Rabaute T., Savinaud M., Udroui C., Valero S., Bégué A., Dejoux J.-F., El Harti A., Ezza-har J., Kussul N., Labbassi K., Lebourgeois V., Miao Z., Newby T., Nyamugama A., Salh N., Shelestov A., Simonneaux V., Traore P.S., Traore S.S., Koetz B.* Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world // *Remote Sensing of Environment*. 2019. № 221. P. 551–568. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.007>
- Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P.* Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015. № 163. P. 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>
- Fradette O., Marty C., Faubert P., Dessureault P.-L., Paré M., Bouchard S., Villeneuve C.* Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modelling approach // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 499. 119565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>
- Fraser R.H., Oltho, I., Pouliot D.* Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks // *Remote Sensing of Environment*. 2009. № 113. P. 1397–1409. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.019>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.M.* MODIS collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2010. № 114. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Gómez C., White J.C., Wulder M.A.* Optical remotely sensed time series data for land cover classification: a review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. № 116. P. 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008>
- Grădinaru S.R., Kienast F., Psomas A.* Using multi-seasonal Landsat-8 OLI imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 96, Pt. 2. P. 79–86.
- Gray J., Song C.H.* Consistent classification of image time series with automatic adaptive signature generalization // *Remote Sensing of Environment*. 2013. № 134. P. 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.022>
- Janus J., Božek P., Mitka B., Tazsakowski J., Doróż A.* Long-term forest cover and height changes on abandoned agricultural land: An assessment based on historical stereometric images and airborne laser scanning data // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 120. 106904. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106904>
- Kolecka N., Kozak J., Kaim D., Dobosz M., Ginzler C., Psomas A.* Mapping secondary forest succession on abandoned agricultural land in the Polish Carpathians // *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. Vol. XLI-B8. P. 931–935.
- Levers C., Schneider M., Prishchepov A.V., Estel S.* Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe // *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 644. P. 95–111.
- Liu J., Kuang W.H., Zhang Z.X., Xu X.L., Qin Y.W., Ning J., Zhou W.C., Zhang S.W., Li R.D., Yan C.Z., Wu S.X., Shi X.Z., Jiang N., Yu D.S., Pan X.Z., Chi W.F.* Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s // *Journal of Geographical Sciences*. 2014. № 24. P. 195–210. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1082-6>
- Liu B., Song W.* Mapping abandoned cropland using Within-Year Sentinel-2 time series // *CATENA*. 2023. Vol. 223. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106924>
- Löw F., Fließmann E., Abdullaev I., Conrad C., Lamers J.P.A.* Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing // *Applied Geography*. 2015. Vol. 62. P. 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.009>

- Mainali K., Evans M., Saavedra D., Mills E., Madsen B., Minnemeyer S.* Convolutional neural network for high-resolution wetland mapping with open data: Variable selection and the challenges of a generalizable model // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 861. 160622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160622>
- Nordén B., Olsen S.L., Haug S., Rusch G.* Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone – Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 489. 119045. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>
- Parés-Ramos I.K., Gould W.A., Aide T.M.* Agricultural abandonment, suburban growth, and forest expansion in Puerto Rico between 1991 and 2000 // *Ecology and Society*. 2008. № 13(8). <https://doi.org/10.5751/ES-02479-130201>
- Pax-Lenney M., Woodcock C.E., Macomber S.A., Gopal S., Song C.* Forest mapping with a generalized classifier and Landsat-8 OLI TM data // *Remote Sensing of Environment*. 2001. № 77. P. 241–250. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00208-5)
- Pedersen N.K., Schmidt I.K., Kepfer-Rojas S.* Drivers of tree colonization, species richness, and structural variation during the initial three decades of natural forest colonization in abandoned agricultural soils // *Forest Ecology and Management*. 2023. Vol. 543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121138>
- Phalke A.R., Özdoğan M.* Large area cropland extent mapping with Landsat-8 OLI data and a generalized classifier // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 219. P. 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.025>
- Pointereau P., Coulon F.P., Girard M.L., Stuczynski T., Ortega V.S., Del Rio A.* Analysis of farmland abandonment and the extent and location of agricultural areas that are actually abandoned or are in risk to be abandoned // *JRC Scientific and Technical Reports*. 2008 (EUR23411 EN).
- Song W.* Mapping Cropland Abandonment in Mountainous Areas Using an Annual Land-Use Trajectory Approach // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 1–24
- Thenkabail P.S., Knox J.W., Ozdogan M., Gumma M.K., Congalton R.G., Zhuoting W.U., Milesi C., Finkral A., Marshall M., Mariotto I.* Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security: how can remote sensing help? // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2012. № 78(8). P. 773–782.
- Wittke S., Xiaowei Y., Karjalainen M., Hyyppä J., Puttonen E.* Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 76. P. 167–178.
- Xu Y., Yu L., Zhao F.R., Cai X., Zhao J., Lu H., Gong P.* Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat-8 OLI images with a change detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa // *Remote Sensing of Environment*. 2018. № 218. P. 13–31. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.09.008>