

Анализ трендов временных рядов вегетационных индексов по данным MODIS для оценки влияния засух на лесные насаждения Среднего Поволжья с 2000 по 2020 год

О. Н. Воробьев¹, Э. А. Курбанов¹, Дж. Ша², С. А. Лежнин¹,
Дж. Ван³, Дж. Коул⁴, Д. М. Дергунов¹

¹ *Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов,
Поволжский государственный технологический университет
Йошкар-Ола, 424000, Россия
E-mail: kurbanovea@volgatech.net*

² *Колледж географии, Фуцзяньский педагогический университет
Фучжоу, 350007, Китай
E-mail: jmsha@fjnu.edu.cn*

³ *Факультет географии, Юньнаньский педагогический университет
Куньмин, 650500, Китай
E-mail: jlwang@ynnu.edu.cn*

⁴ *Совет по наукам о Земле, Претория, 0001, Южная Африка
E-mail: jcole@geoscience.org.za*

Оперативный, точный и регулярный мониторинг засухи на основе спутниковых данных представляется важной составляющей при оценке состояния и продуктивности лесных насаждений. В работе проведён пространственно-временной анализ влияния засухи на лесные экосистемы Среднего Поволжья России за период с 2000 по 2020 г. на основе оценки временных рядов данных MODIS разностного индекса вегетации (NDVI), индекса состояния растительности (VCI), стандартизованного индекса осадков (SPI) и их стандартизованных аномалий. Растровые карты пространственного распределения трендов исследуемых индексов на площади лесного покрова были получены методом геостатистической интерполяции «Кригинг». Исследование выявило, что два метеорологических показателя (температура и осадки), полученные по спутниковым данным, оказываются наиболее приемлемыми для оценки NDVI в засушливые годы. Возможности использования аномальных значений изучаемых индексов ограничены в силу особенностей отклика на негативные последствия влияния засушливого сезона на лесной покров. При мониторинге засух на территории крупных лесных массивов необходимо учитывать локальные пространственно-временные тренды исследуемых индексов, что позволит оценить ситуацию в целом. Индекс VCI на примере отдельного региона (Республика Марий Эл) позволил провести более точную оценку влияния интенсивности засухи на состояние и продуктивность лесных насаждений, чем для всего исследуемого региона. Анализ линейного тренда временного ряда NDVI за 20-летний период демонстрирует устойчивый рост продуктивности лесных насаждений Среднего Поволжья. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозного мониторинга засухи с целью обнаружения влияния изменения климата на леса Среднего Поволжья и оценки вероятности повреждения лесов на региональном и локальном уровнях.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, засуха, климат, среднее Поволжье, лесные экосистемы, MODIS, SPI, VCI, NDVI

Одобрена к печати: 28.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194

Введение

Одним из негативных последствий процесса глобального изменения климата для наземных экосистем становится гибель лесных насаждений, вызванная комплексным воздействием на них засухи и высокой температуры атмосферы (IPCC..., 2019). Засуха также влияет на состояние и устойчивость лесов, что, в свою очередь, может привести к нарушению экологического функционирования и распределения лесных насаждений, гидрологического цикла, а также повышению интенсивности пожаров (Cobb et al., 2017). Считается, что снижение количества

осадков и высокая температура приземного слоя атмосферы могут привести в ближайшие десятилетия к увеличению частоты засух и более интенсивному воздействию на экосистемы (Allen et al., 2015). Количество исследований в этой области с использованием спутниковых данных заметно выросло после засух 2010 и 2012 гг. на территории Российской Федерации (Воробьев, Курбанов, 2017; Золотокрылин и др., 2013; Савин и др., 2011; Loboda et al., 2017).

В последние десятилетия были разработаны многочисленные индексы, позволяющие оценить засуху в области метеорологии, гидрологии, сельского и лесного хозяйства, дистанционного зондирования и управления водными ресурсами (Zargar et al., 2011). Многие из таких индексов, характеризующие взаимосвязь между растительным покровом и показателями засухи, применяются при оценке и дистанционном мониторинге лесных экосистем в засушливые периоды. Наиболее широко используемыми из них считаются стандартизированный индекс осадков (*англ.* Standardized Precipitation Index — SPI), нормализованный разностный вегетационный индекс (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI), индекс вегетационных условий (*англ.* Vegetation Condition Index — VCI) и усовершенствованный вегетационный индекс (*англ.* Enhanced Vegetation Index — EVI) (Курбанов, Воробьев, 2020; Marumbwa et al., 2020; Tian et al., 2015). Следующий ряд индексов представляет собой комбинированное использование показателей состояния растительности и температуры поверхности земли (*англ.* Land Surface Temperature — LST). Объединив VCI и индекс температурного состояния (*англ.* Temperature Condition Index — TCI), Ф. Н. Коган (Kogan, 1998) предложил индекс здоровья растительности (*англ.* Vegetation Health Index — VHI). Авторы работы (Carlson et al., 1994) предложили индекс снабжения водой растительности (*англ.* Vegetation Supply Water Index — VSWI), основанный на NDVI и LST.

Все вышеприведенные индексы дистанционного зондирования могут указывать на уменьшение площади листьев и содержания хлорофилла, после того как растительность подверглась воздействию засухи. Кроме того, они не только отражают пространственно-временную изменчивость растительного покрова, но и позволяют оценить степень воздействия засухи на растительность (Cong et al., 2017). Следовательно, для оценки и дистанционного мониторинга состояния лесных экосистем следует использовать индексы засухи и точные региональные метеорологические данные.

Цель работы — провести регрессионный и пространственно-временной анализ влияния засухи на лесные экосистемы Среднего Поволжья. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- Создана комплексная система цифровых картографических материалов в ГИС-приложении ArcGIS Pro (ГИС — геоинформационные системы) на территорию исследования, включающая лесной покров и климатические данные.
- Проанализированы временные ряды индексов NDVI, VCI, SPI и их аномалий за 2000–2020 гг., а также их связь с климатическими показателями LST и Pr (*англ.* precipitation — осадки).
- Проведена оценка пространственно-временных трендов климатических и вегетационных индексов на территорию лесного покрова Среднего Поволжья.

Объекты и методика исследований

Объектом исследования выступает лесной покров, включающий хвойные, смешанные и широколиственные лесные насаждения на территории Среднего Поволжья России, расположенные в границах мозаики безоблачных снимков Landsat-8 за 2020 г. (earthexplorer.usgs.gov) (*рис. 1*, см. с. 183). В работе использован набор композитных изображений NDVI с 250-метровым пространственным и 16-дневным временным разрешением на базе продукта MODIS/Terra (MOD13Q1) (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 20-летний вегетационный период (май–сентябрь) с 2000 по 2020 г., полученный на геопортале НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration) (https://lpdaac.usgs.gov/get_data).

Среднемесячные значения показателей LST и Pr на территорию исследования были также получены из архивных данных НАСА, модель GPM_3IMERGM_v06 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

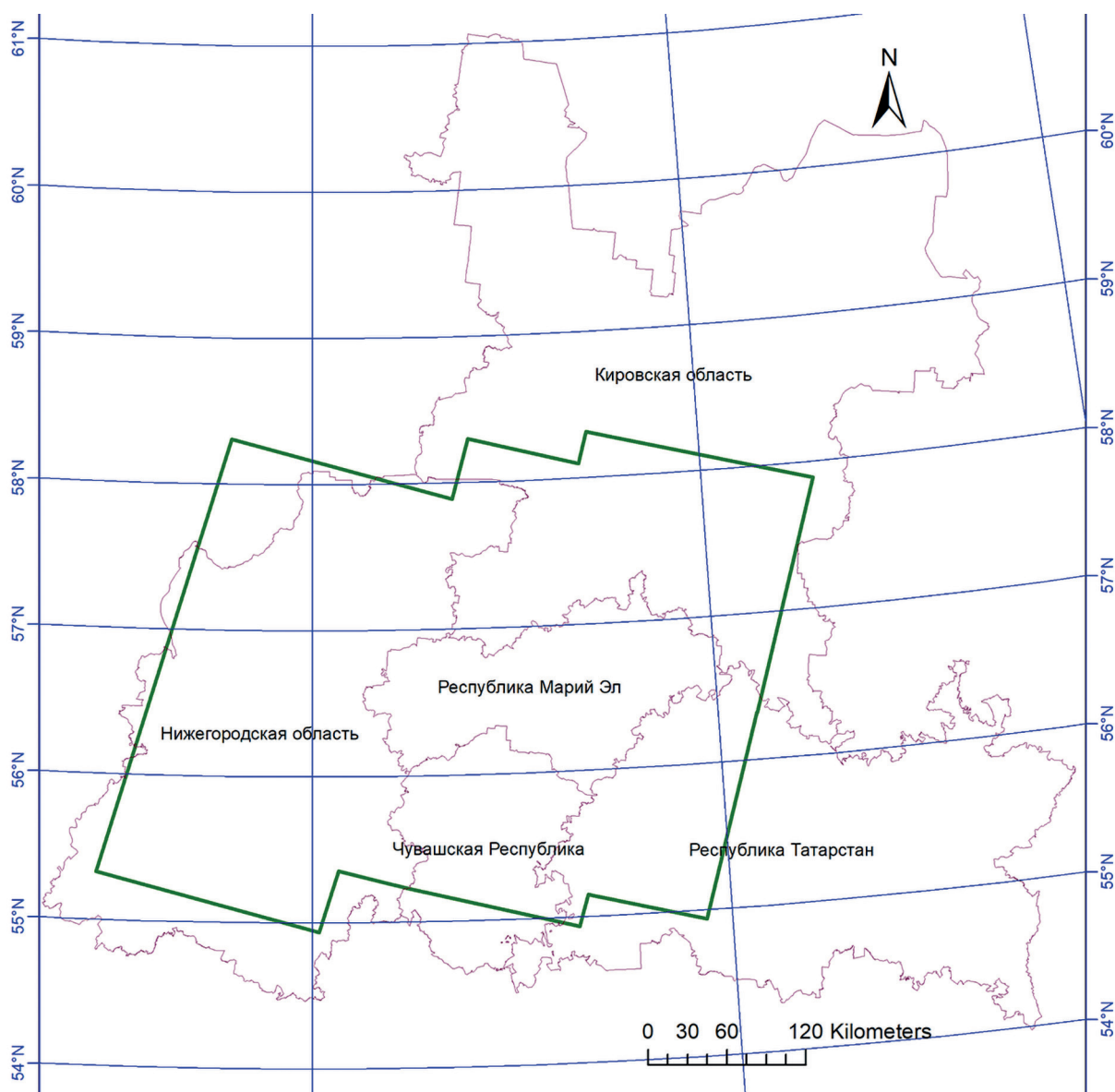


Рис. 1. Регион исследования Среднего Поволжья на мозаике безоблачных изображений Landsat-8 2020 г. (контур зелёного цвета)

Площадь исследуемого лесного покрова была выделена на основе классификации и генерализации шести снимков Landsat-8, предварительно трансформированных в формат BGW (B — *англ.* Brightness, яркость; G — *англ.* Greenness, зелень; W — *англ.* Wetness, влажность) (Курбанов, Воробьев, 2020). В результате был получен тематический слой «Лес», в который вошли все основные лесообразующие породы региона (Курбанов и др., 2018). Все картографические цифровые слои и атрибутивные данные обрабатывались в пакете ArcGIS Pro. Для оценки и картографирования индексов засушливости (засухи) на территорию исследования была создана векторная регулярная сеть 79 334 тестовых точечных данных с шагом 1×1 км, включающая все лесные насаждения площадью не менее 0,5 га (рис. 2, см. с. 184). В работе использовались несколько вегетационных и метеорологических индексов, подробно описанных ниже.

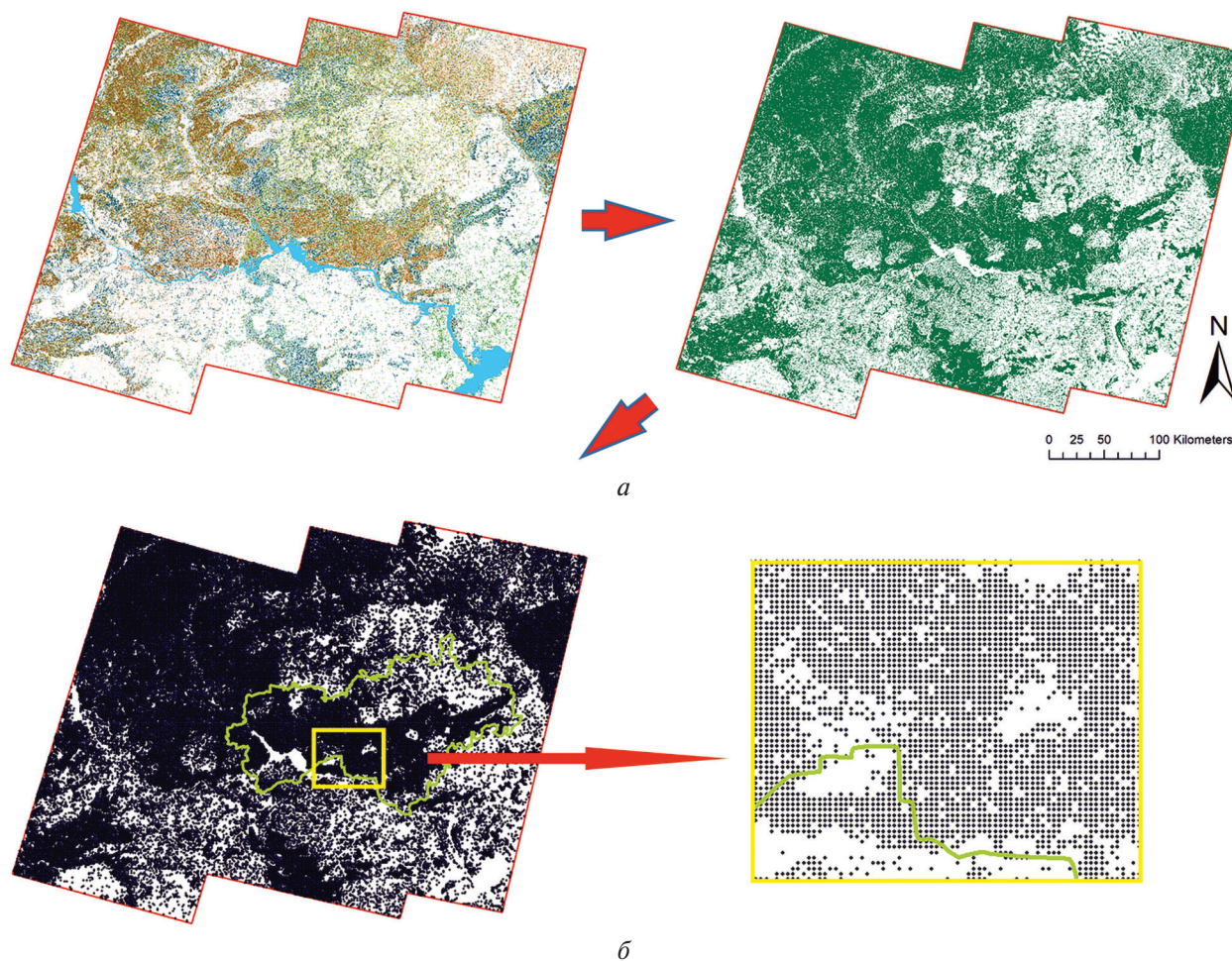


Рис. 2. Тематические карты: а — маска лесов, созданная на базе тематической карты лесного покрова территории исследования; б — регулярная сеть тестовых участков с шагом между узлами 1 км

Для оценки влияния дефицита осадков на растительность был использован индекс SPI, показывающий среднесрочные сезонные тренды осадков, значения которого могут быть определены для каждой точки исследуемой территории по серии месячных данных сумм осадков (Справочник..., 2016; Hayes et al., 1999). При определении SPI временные ряды месячных данных сумм осадков преобразовывались с помощью функции плотности вероятности гамма-распределения (Черенкова, Золотокрылин, 2016). Пороговые значения для оценки интенсивности метеорологической засухи по данным SPI представлены в *таблице* (McKee et al., 1993). Положительные значения SPI в *таблице* указывают на влажные условия (осадки), отрицательные — на сухость.

Градации значений SPI и VCI по уровням интенсивности засух

Значения SPI	Условия засушливости	Значения VCI	Интенсивность засухи
< -2	Экстремально сухо	—	—
от -2,0 до -1,5	Сильно сухо	$35 \leq$	Экстремальная
от -1,5 до 1,0	Умеренно сухо	$35 \leq VCI < 45$	Высокая
от -0,5 до 0,5	Почти нормально	$45 \leq VCI < 60$	Умеренная
от 1,0 до 1,5	Умеренно влажно	$60 \leq VCI < 70$	Низкая
от 1,5 до 2,0	Очень влажно	≥ 70	Отсутствие
> 2	Экстремально влажно	—	—

Индекс VCCI, позволяющий оценивать стрессовое состояние растительности и сравнивать значения NDVI не только в разных географических условиях, но и для разных типов растительного покрова, определялся по следующей формуле:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100 \%, \quad (1)$$

где $NDVI_i$ — значение NDVI для конкретного периода; $NDVI_{\max}$ и $NDVI_{\min}$ — максимальные и минимальные значения NDVI для соответствующего периода. Максимальное и минимальное значения знаменателя показывают наилучшие и наихудшие условия для роста растительности соответственно, а разница между ними свидетельствует об условиях их местопроизрастания.

Индекс VCI, рекомендованный для дистанционного мониторинга засух Всемирной метеорологической организацией (ВМО, *англ.* World Meteorological Organization — WMO), обычно применяется для оценки воздействия засухи на растительность, особенно в районах, где эпизоды засушливости носят локализованный и нечётко выраженный характер (Справочник..., 2016). Для анализа изменений трендов индексов вегетации и климатических факторов на исследуемой территории Среднего Поволжья с 2000 по 2020 г. значения VCI были классифицированы по четырём уровням интенсивности засух (см. *таблицу*) (Qian et al., 2016).

Временные ряды остальных изучаемых индексов и климатических показателей (NDVI, VCI, Pr, LST) были подвергнуты статистическому анализу для лучшего понимания закономерности временных изменений и их взаимосвязи. *Аномалия временного ряда* (Z-оценка) за 2000–2020 гг. вычислялась по следующей формуле:

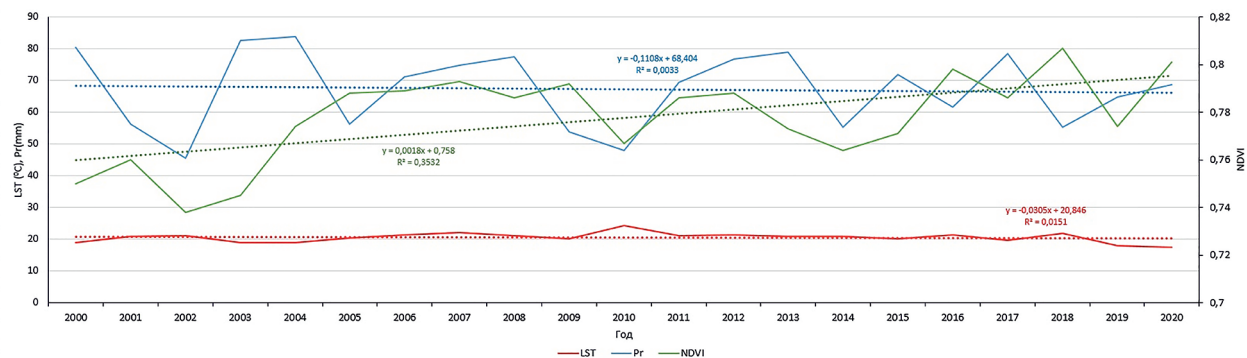
$$Z = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (2)$$

где x_i — значение временного ряда для данного момента i ; μ и σ — соответственно среднее значение и значение стандартного отклонения временного ряда. Отрицательное значение Z указывает на условия вегетации ниже нормы для исследуемого показателя, что соответствует периоду засухи, а положительное — на условия вегетации выше нормы, что свидетельствует об обратном (Barbosa et al., 2006). Оценка положительных и отрицательных значений Z -показателя для аномалий временных рядов LST и Pr следует тем же принципам. Отрицательный Z указывает на значения температуры или осадков ниже нормы, а положительный свидетельствует о тёплых и влажных сезонах (Santos et al., 2019). В работе также использованы методы регрессионного анализа и моделирования. Для получения карт, показывающих пространственное варьирование обобщённых значений исследуемых индексов, были использованы их данные, полученные по регулярной сети из 79 334 точек на всю исследуемую территорию. Далее растровое изображение генерировалось с использованием метода геостатистической интерполяции «Кригинг».

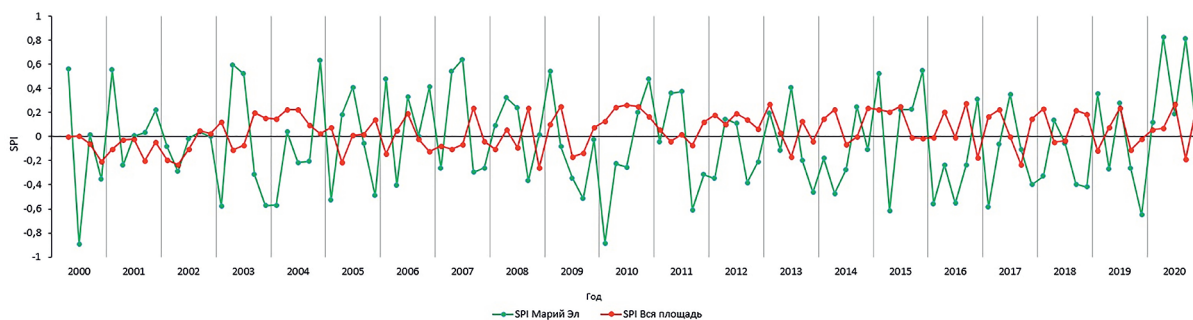
Результаты и обсуждение

При оценке влияния засухи на лесные экосистемы Среднего Поволжья особое внимание уделено экстремально засушливым периодам исследуемых временных рядов (Javed et al., 2020). В целом динамика NDVI лесного покрова имеет характерное сезонное распределение, достигая минимальных значений к концу весеннего (май) или к началу осеннего (сентябрь) сезона, что также подтверждается частичным совпадением линии NDVI с графиком температур LST (*рис. 3а*). Анализ линейного тренда временного ряда NDVI за 20-летний период демонстрирует устойчивый рост биологической продуктивности лесных насаждений Среднего Поволжья (см. *рис. 3а*). Минимальные значения NDVI (фитомассы) лесного покрова в 2002, 2010, 2014 и 2019 гг. оказываются следствием воздействия на них негативных факторов природного характера. Особенно такое снижение NDVI заметно в аномально засушливый и жаркий период 2010 г. (см. *рис. 3а*). Линейные тренды рядов LST и Pr не показали существенных изменений

за 20-летний период. При этом минимальные значения P_r в эти годы могут наблюдаться как в начале, так и в конце вегетации (см. *рис. 3а*). Максимальные значения P_r приходились на середину вегетационного периода (июнь – июль) в 2004, 2005, 2015 и 2017 гг. Максимальные значения LST для исследуемой территории пришлось на вегетационные периоды 2002, 2007, 2010, 2016 и 2018 гг., что в целом соответствует засушливым периодам с минимальными значениями осадков (см. *рис. 3а*).



а



б

Рис. 3. Временные ряды вегетационных периодов (май – сентябрь) за 2000–2020 гг.: а – средние значения NDVI, осадков и температур территории исследования Среднего Поволжья; б – динамика индекса SPI для Республики Марий Эл и всей территории исследования

Анализ динамики SPI для всего региона (*рис. 3б*) показал те же самые отклонения (дефицит осадков), которые характерны и для графика *рис. 3а* в периоды с 2000 по 2002, 2013 и 2020 гг. В целом динамика SPI находится в диапазоне значений от $-0,5$ до $+0,5$, что соответствует нормальному циклу осадков для Среднего Поволжья (см. *таблицу*). Стоит отметить, что индекс SPI в 2010 г. показывал положительные значения, несмотря на то что этот год был аномально засушливым и сопровождался крупными лесными пожарами. В то же время значения индекса SPI в 2010 г. для территории Республики Марий Эл находились в основном в отрицательной зоне (см. *рис. 3б*), что свидетельствует о повышении точности дистанционных оценок засушливых периодов при проведении более локальных исследований.

В сравнении с данными динамики аномалий и средних показателей NDVI временные ряды индекса VCI имеют аналогичную картину (*рис. 4а*, см. с. 187). В течение почти всего исследуемого периода на большей части территории Среднего Поволжья значения VCI превышали порог в 60 %, что соответствует низкой интенсивности засухи (см. *таблицу*). Об этом также свидетельствуют исследования других учёных (Ивлиева и др., 2013). Даже в самые засушливые 2002 и 2010 гг. значения VCI не опускались ниже уровня 50 %. Средние значения индексных показателей VCI почти не отражают влияние засушливых сезонов на лесной покров, что можно объяснить большой площадью лесных насаждений на территории исследования и их относительной устойчивостью к засухе. Наблюдаемое небольшое снижение показателей VCI в конце 2002, 2011 гг. и особенно в 2019 г. является результатом отложенного

эффекта влияния прошлогодней засухи. Все эти процессы, включая низкий уровень почвенного влагосодержания в засушливые сезоны и более раннее наступление осеннего сезона, также отражаются на динамике индексных значений.

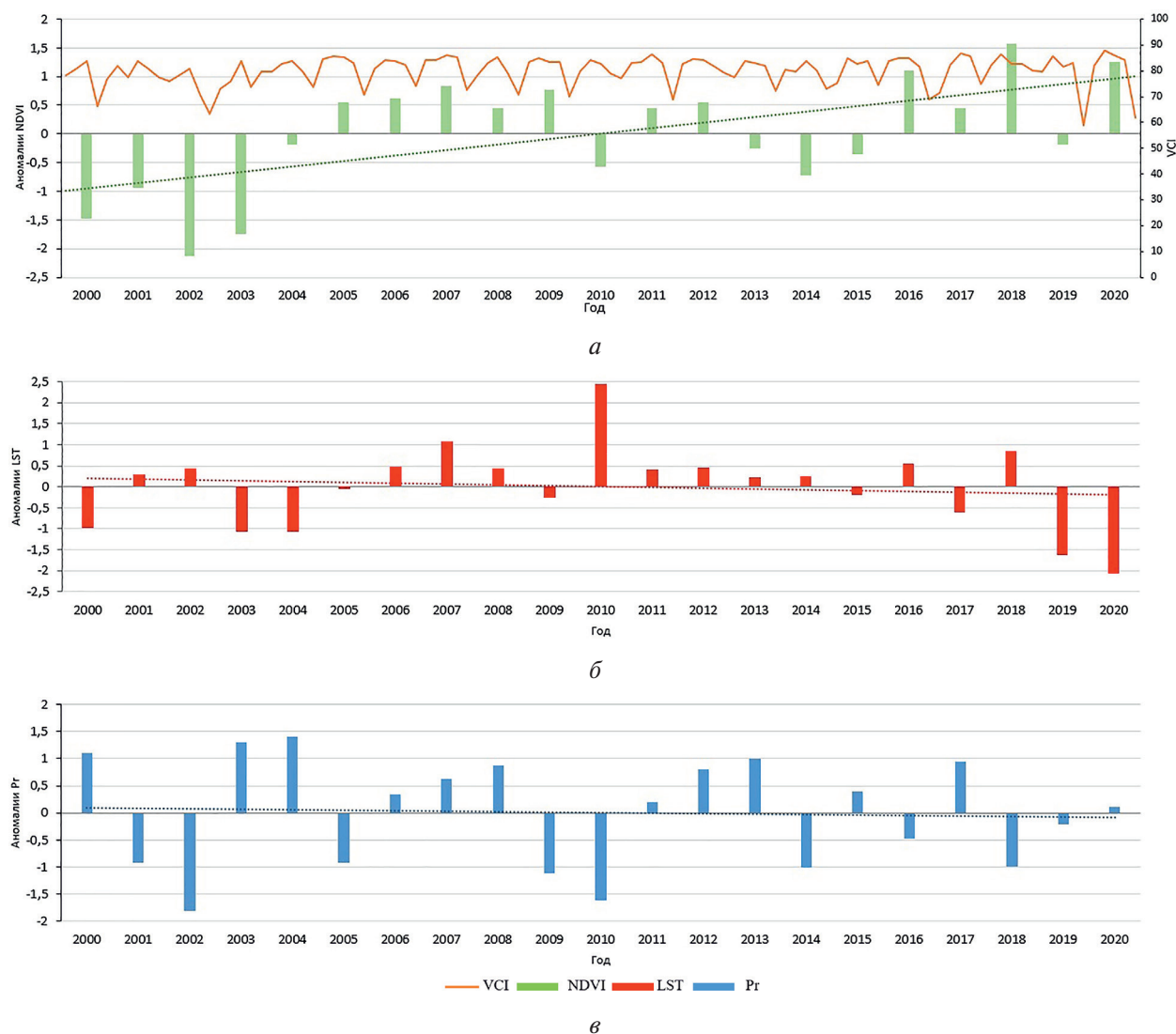


Рис. 4. Динамика значений аномалий временных рядов: а — VCI и NDVI; б — LST; в — Pr

В первую декаду общая картина динамики аномалий NDVI показывает определённую устойчивость (см. рис. 4а). За этот же период аномалии осадков и температуры демонстрируют синусоидальные тренды, также находящиеся в пределах оптимальных величин для Среднего Поволжья (см. таблицу, рис. 4б, в). За 20-летний период линейный тренд аномалий NDVI (см. рис. 4а) демонстрирует положительную динамику, что подтверждает устойчивый рост лесных насаждений. Относительно низкие или отрицательные значения аномалий NDVI на следующий год после засухи — это отклик лесных экосистем на экстремально засушливые годы. В 2002 г. восстановление NDVI до оптимальных величин длилось почти три года.

Последующее снижение значений аномалий NDVI в 2011 и 2012 гг. представляется откликом лесных экосистем на засушливый 2010 г. и последствия крупных лесных пожаров на территории Нижегородской обл., республик Марий Эл и Чувашии, что подтверждается исследованиями других авторов (Савин и др., 2011). Снижение уровня осадков в эти же годы — важный фактор, влияющий на NDVI лесов. Последующий с 2011 г. временной ряд аномалий NDVI можно охарактеризовать как период относительного восстановления потерь в лесном

покрова региона после засухи и пожаров в основном за счёт естественного лесовозобновления. Отрицательные значения аномалий NDVI в 2013–2015 гг. свидетельствуют о засушливом периоде на исследуемой территории средней интенсивности. Пространственный анализ распределения трендов средних значений NDVI, LST и Pr за исследуемый период подтверждает вышеприведённые оценки (рис. 5). Общая картина пространственного распределения NDVI лесного покрова Среднего Поволжья представлена в основном положительными значениями, что свидетельствует об их устойчивом состоянии. Исключение составляют участки в центральной и южной частях региона исследования, подвергшиеся лесным пожарам (см. рис. 5а). Пространственное распределение LST и Pr на исследуемой территории за 20-летний период носит неравномерный характер. Особенно это заметно на горях 2010 г. в Нижегородской обл. и Республике Марий Эл (см. рис. 5б). На этих площадях наблюдается значительное увеличение пространственного тренда средних значений температуры. Для территории республик Марий Эл и Чувашии за 20-летний период пространственный тренд осадков показывает средние и минимальные значения (см. рис. 5в).

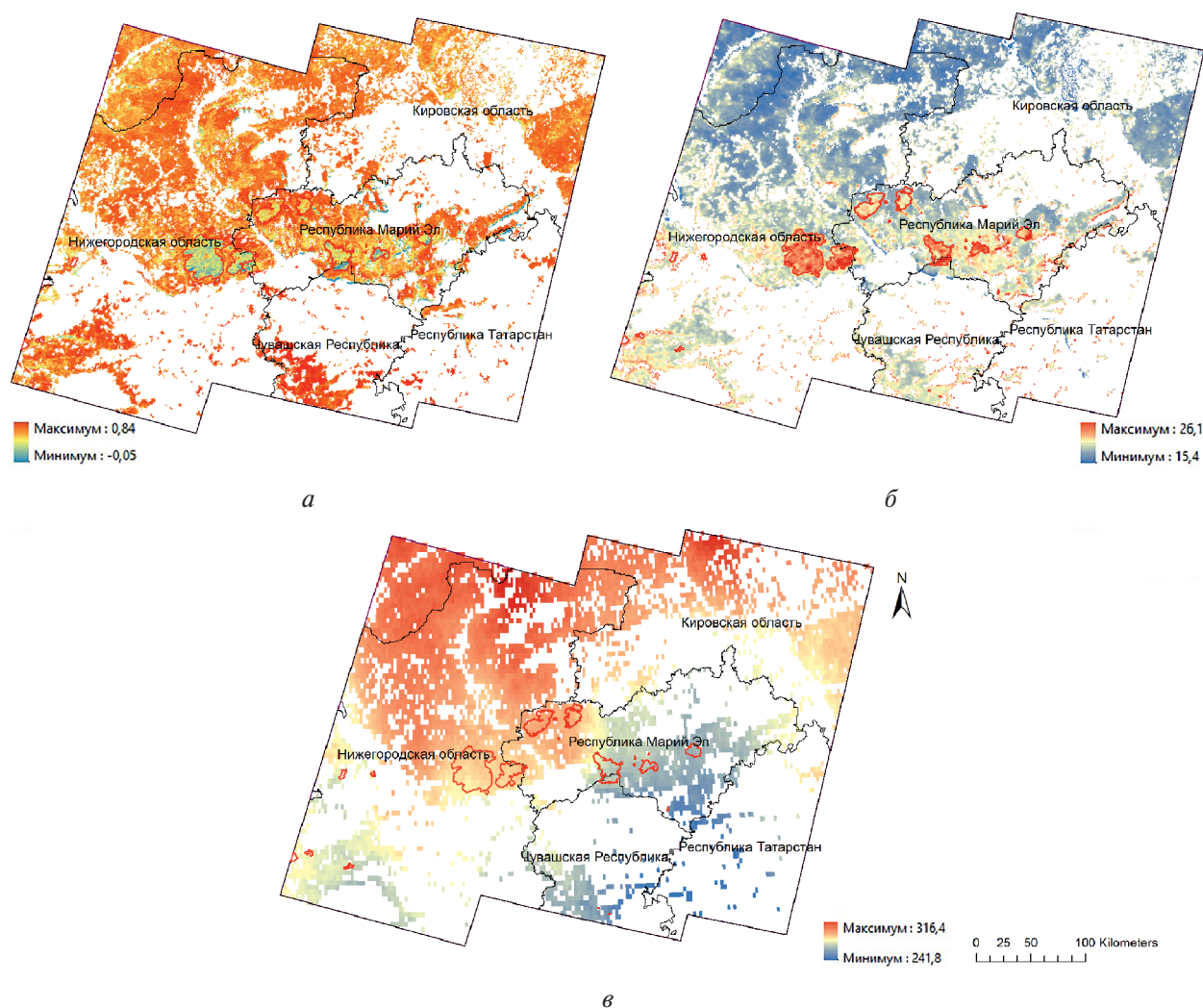


Рис. 5. Пространственное распределение за 20-летний период тренда средних значений: а – NDVI; б – LST; в – Pr. Лесные гари 2010 г. выделены контуром красного цвета

Динамика продуктивности лесов на исследуемой территории в зависимости от показателей засухи может быть описана линейной моделью множественной регрессии:

$$NDVI(t) = 0,08 + 0,69 \times LST + 0,11Pr \quad (R^2 = 0,65), \quad (3)$$

$$VCI(t) = 75,3 + 9,13 \times LST + 0,48Pr \quad (R^2 = 0,53), \quad (4)$$

где t — время (от 1 до 100 мес) за 20-летний период; LST — температура подстилающей поверхности наземного покрова; Pr — осадки.

Как показал регрессионный анализ, основным фактором, влияющим на динамику NDVI лесного покрова, выступает температура приземного слоя атмосферы (модель 3). Уровень осадков оказывается важным, но не ключевым фактором, влияющим на NDVI, в том числе и из-за относительно невысокой годовой эвапотранспирации широколиственных и хвойных древесных пород региона (Шарый и др., 2020). Ещё слабее связь с климатическими данными показал индекс VCI (модель 4). Эти положения подтверждают выводы учёных, проводивших подобные исследования в других регионах мира (Clark et al., 2016; Hou et al., 2020). Подтверждением этому также служит корреляционная зависимость значений NDVI от показателей температур LST за 20-летний период при статистической значимости 0,95 % (рис. 6). Максимально тесная связь наблюдается в северной, локально в центральной и северо-восточной частях территории исследования, более представленных лиственными насаждениями и, как следствие, устойчиво связанных с сезоном вегетации. Умеренные значения корреляционной связи между этими индексами наблюдаются в западной, частично в центральной и южной частях Среднего Поволжья, на площади с преобладанием хвойных и смешанных древостоев. На уменьшение тесноты взаимосвязи также влияют последствия аномальных засух, что наглядно продемонстрировано на участках лесных пожаров 2010 г.

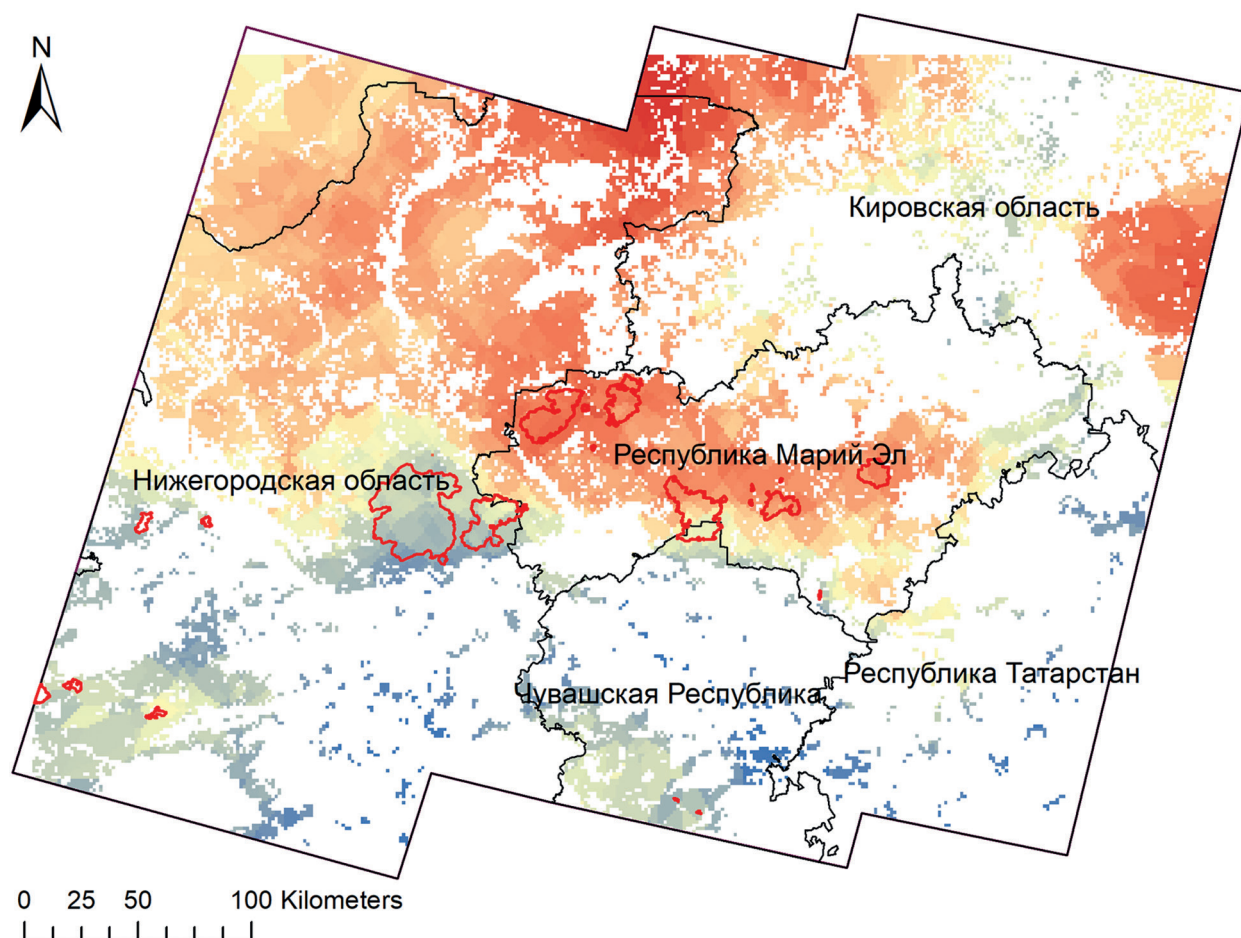


Рис. 6. Пространственное распределение корреляционной связи между значениями NDVI и LST за 20-летний период

Заключение

В работе проведена оценка влияния средней температуры и осадков на динамику продуктивности лесов Среднего Поволжья и выявлены пространственно-временные закономерности распределения их NDVI с использованием индексных показателей VCI и SPI, полученных на основе данных MODIS за 20-летний период. Исследование выявило, что два метеорологических показателя (LST и Pr), полученные по спутниковым данным, считаются наиболее приемлемыми для оценки NDVI в засушливые годы. При этом для повышения оценки точности влияния интенсивности засухи на продуктивность лесных насаждений требуется комбинирование этих показателей. Отклонение значений NDVI на всей территории исследования, объясняемое климатическими переменными, в целом превышало 50 % за оцениваемый период времени.

Анализ временных рядов средних значений NDVI, LST и Pr за 20-летний период показал более тесную линейную связь и согласованность, чем между показателями аномалий (Z-оценка) этих же временных рядов. Такое положение может быть следствием охвата исследованиями большой площади территории Среднего Поволжья, которая представлена различными природными условиями и лесными насаждениями. Значения индекса NDVI в силу устойчивости хвойно-широколиственных (смешанных) лесов к стрессовым ситуациям не показывают резкие отклонения от средних величин (менее 0,7) в течение всего периода. Между тем временные ряды аномалий NDVI, LST и Pr демонстрируют высокую степень вариации, что способствует их оценке, особенно в засушливые и влажные годы. В течение всего исследуемого 20-летнего периода наблюдается чередование аномалий LST и Pr для лесного покрова, значения которых могут колебаться для температуры от $-1,5$ до $+2,4$ °C, а для осадков — от $-1,8$ до $+1,4$ °C соответственно (см. рис. 4б, в). При этом дефицит осадков не считается основной причиной, определяющей состояние лесной растительности при засухе в Среднем Поволжье.

Регрессионный анализ выявил, что LST представляется наиболее оптимальным климатическим показателем для объяснения вариации NDVI и VCI за вегетационный период. Тренд временных рядов NDVI демонстрирует более тесную зависимость от температурного режима во время засушливых сезонов, чем от показателей VCI. Между тем анализ SPI на уровне отдельного региона (например, засушливый 2010 г. в Республике Марий Эл) позволяет провести более точную оценку влияния интенсивности засухи на состояние и продуктивность лесных насаждений. В целом негативное влияние засухи на лесные экосистемы может иметь отложенный эффект, который проявляется по сниженным значениям NDVI через год и более после засушливого сезона.

Анализ индексов NDVI, LST и VCI, полученных по спутниковым данным, показывает, что для мониторинга засух на большой территории лесного покрова их применение приводит к интерполированному (сглаженному) эффекту, не позволяющему в полной мере делать выводы о происходящих нарушениях. Для большей точности подобных исследований следует учитывать локальные (наземные) климатические данные. В целом динамика NDVI за 20-летний период демонстрирует устойчивый рост лесных насаждений Среднего Поволжья (см. рис. 3а), что также подтверждается пространственным анализом. Это обстоятельство служит важным фактором при выполнении обязательств Российской Федерации по задачам (целям) в области устойчивого развития и Парижского соглашения по изменению климата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, MOST (англ. Ministry of Science and Technology) и NRF (англ. National Research Foundation) в рамках научного проекта № 19-55-80010.

Литература

1. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на горях Марийского лесного Заволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 124–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97.
2. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Виноградова В. В. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 246–253.
3. Ивлиева Н. Г., Манухов В. Ф., Хлевина С. Е. Пространственно-временной анализ изменения климата в зоне широколиственных лесов правобережья Волги // Материалы Международ. конф. «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2013. № 19(1). С. 62–68.
4. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технолог. ун-т, 2020. 266 с.
5. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Меньшиков С. А., Смирнова Л. Н. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 18. № 5. С. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
6. Савин И. Ю., Барталев С. А., Луян Е. А., Толпин В. А., Медведева М. А., Плотников Д. Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 150–162.
7. Справочник по показателям и индексам засушливости: Комплексная программа борьбы с засухой. Средства и руководящие указания по комплексной борьбе с засухой. Сер. 2 / Всемирная метеорологическая организация (ВМО); Глобальное водное партнерство. 2016. 60 с.
8. Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 79–94. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>.
9. Шарый П. А., Шарая Л. С., Сидякина Л. В. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 154–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
10. Allen C. D., Breshears D. D., McDowell N. G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene // Ecosphere. 2015. V. 6. Iss. 8. P. 1–55. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>.
11. Barbosa H. A., Huete A. R., Baethgen W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil // J. Arid Environments. 2006. No. 67. P. 288–307. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.022>.
12. Carlson T. N., Gillies R. R., Perry E. M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover // Remote Sensing Reviews. 1994. V. 9(1–2). P. 161–173. <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>.
13. Clark J. S., Iverson L., Woodall C. W., Allen C. D., Bell D. M., Bragg D. C., D'Amato A. W., Davis F. W., Hersh M. H., Ibanez I., Jackson S. T., Matthews S., Pederson N., Peters M., Schwartz M. W., Waring K. M., Zimmermann N. E. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States // Global Change Biology. 2016. V. 22. No. 7. P. 2329–2352. <https://doi.org/10.1111/gcb.13160>.
14. Cobb R. C., Ruthrof K. X., Breshears D. D., Lloret F., Aakala T., Adams H. D., Anderegg W. R. L., Ewers B. E., Galiano L., Grünzweig J. M. Ecosystem dynamics and management after forest die-off: a global synthesis with conceptual state-and-transition models // Ecosphere. 2017. V. 8. Iss. 12. Art. No. e02034. 17 p. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2034>.
15. Cong D., Zhao S., Chen C., Duan Z. Characterization of droughts during 2001–2014 based on remote sensing: a case study of Northeast China // Ecological Informatics. 2017. V. 39. P. 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.005>.
16. Hayes M. J., Svoboda M. D., Wilhite D. A., Vanyarkho O. V. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index // Bull. American Meteorological Society. 1999. V. 80. No. 3. P. 429–438.
17. Hou M., Venäläinen A. K., Wang L., Pirinen P., Gao Y., Jin S., Zhu Y., Qin F., Hu Y. Spatio-temporal divergence in the responses of Finland's boreal forests to climate variables // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. V. 92. Art. No. 102186. 9 p. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102186.
18. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / eds. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts,

- P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley. WMO, UNEP, 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
19. Javed T., Yao N., Chen X., Suon S., Li Y. Drought evolution indicated by meteorological and remote-sensing drought indices under different land cover types in China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. V. 27. P. 4258–4274. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06629-2>.
 20. Kogan F.N. Global drought and flood-watch from NOAA polar-orbiting satellites // *Advances in Space Research*. 1998. V. 21(3). P. 477–480. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00883-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00883-1).
 21. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Joanne H. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia // *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991* / eds. G. Gutman, R. Volker. Springer Intern. Publ., 2017. P. 173–192. DOI: 10.1007/978-3-319-42638-9_8.
 22. Marumbwa F.M., Cho M.A., Chirwa P.W. An assessment of remote sensing-based drought index over different land cover types in southern Africa // *Intern. J. Remote Sensing*. 2020. V. 41. No. 9. P. 7368–7382. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1757783>.
 23. McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // 8th Conf. Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993. P. 179–184.
 24. Santos G.M., Melendez-Pastor I., Navarro-Pedreno J., Koch M. Assessing water availability in Mediterranean regions affected by water conflicts through MODIS data time series analysis // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Iss. 11. No. 1355. 20 p. <https://doi.org/10.3390/rs11111355>.
 25. Tian F., Fensholt R., Verbesselt J., Grogan K., Horion S., Wang Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 163. P. 326–340. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.031>.
 26. Qian X., Liang L., Shen Q., Sun Q., Zhang L., Liu Z., Zhao S., Qin Z. Drought trends based on the VCI and its correlation with climate factors in the agricultural areas of China from 1982 to 2010 // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. V. 188. Iss. 11. Art. No. 639. P. 1–13. DOI: 10.1007/s10661-016-5657-9.
 27. Zargar A., Sadiq R., Naser B., Khan F.I. A review of drought indices // *Environmental Reviews*. 2011. V. 19. No. NA. P. 333–349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>.

Trend analysis of MODIS time series vegetation indices to assess the impact of droughts on forest stands in the Middle Volga from 2000 to 2020

O.N. Vorobyov¹, E.A. Kurbanov¹, J. Sha², S.A. Lezhnin¹,
J. Wang³, J. Cole⁴, D.M. Dergunov¹

¹ Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing,
Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola 424000, Russia
E-mail: kurbanovea@volgatech.net

² College of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China
E-mail: jmsha@fjnu.edu.cn

³ Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China
E-mail: jlwang@ynnu.edu.cn

⁴ Council for Geoscience, Pretoria 0001, South Africa
E-mail: jcole@geoscience.org.za

Timely, accurate and regular monitoring of drought based on satellite data is an important part in assessing the state and productivity of forest stands. In the study we carried out a spatio-temporal analysis of drought impact on forest ecosystems of the Middle Volga region of Russia for 2000 to 2020 based on time series estimation of MODIS difference vegetation index (NDVI), vegetation condition index (VCI), standardized precipitation index (SPI) and their standardized anomalies. Raster maps of the spatial distribution trends of the studied remote sensing indices on the area of forest cover were obtained by the Kriging geostatistical interpolation. The study showed that two meteorological indicators

(temperature and precipitation) obtained from satellite data are the most suitable for estimating NDVI in dry years. The possibilities of using anomalous values of the studied indices are limited due to peculiarities of the response to negative consequences of dry season impact on forest cover. When monitoring droughts on the territory of large forest areas, it is necessary to take into account local spatial and temporal trends of the studied indices, which allow assessing the situation as a whole. On the example of a particular region (the Republic of Mari El) The VCI index made it possible to conduct a more accurate assessment of the impact of drought intensity on the condition and productivity of forest stands than for the entire study region. An analysis of the linear trend of the NDVI time series over a twenty-year period demonstrates a sustainable increase in the productivity of forest stands in the Middle Volga region. The results obtained can be used for both current and predictive drought monitoring to detect the impact of climate change on the forests of the Middle Volga region and assess the probability of forest disturbances at the regional and local levels.

The reported study was funded by RFBR (Russian Foundation for Basic Research), MOST (Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China) and NRF (South Africa's National Research Foundation) in the framework of research project No. 19-55-80010.

Keywords: remote monitoring, draught, climate, Middle Volga, forest ecosystems, MODIS, SPI, VCI, NDVI

Accepted: 28.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194

References

1. Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 124–134 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97.
2. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Cherenkova E. A., Vinogradova V. V., Comparative study of droughts 2010 and 2012 in the European Russia from meteorological and MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 246–253 (in Russian).
3. Ivlieva N. G., Manukhov V. F., Khlevina S. E., Spatio-temporal analysis of climate change in the zone of deciduous forests on the right bank of the Volga, *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "InterKarto. InterGIS"* (InterKarto InterGIS: Proc. Intern. Conf.), 2013, No. 19(1), pp. 62–68 (in Russian).
4. Kurbanov E. A., Vorobiev O. N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote sensing in forestry), Yoshkar-Ola: Volga State Univ. Technology, 2020, 266 p.
5. Kurbanov E. A., Vorobiev O. N., Menshikov S. A., Smirnova L. N., Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 18, No. 5, pp. 154–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
6. Savin I., Bartalev S., Loupian E., Tolpin V., Medvedeva M., Plotnikov D., Satellite monitoring of vegetation affected by drought (using drought 2010 in Russia as an example), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 150–162 (in Russian).
7. *Handbook of Drought Indicators and Indices, Integrated Drought Management Programme, Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*, World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016, 52 p.
8. Cherenkova E. A., Zolotokrylin A. N., On the comparability of some quantitative indicators of drought, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2016, No. 2, pp. 79–94 (in Russian), <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>.
9. Sharyi P. A., Sharaya L. S., Sidiyakina L. V., The relation of forest NDVI to climate in Volga basin, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 154–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
10. Allen C. D., Breshears D. D., McDowell N. G., On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene, *Ecosphere*, 2015, Vol. 6, Issue 8, pp. 1–55, <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>.
11. Barbosa H. A., Huete A. R., Baethgen W. E., A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil, *J. Arid Environments*, 2006, No. 67, pp. 288–307, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.022>.
12. Carlson T. N., Gillies R. R., Perry E. M., A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover, *Remote Sensing Reviews*, 1994, Vol. 9(1–2), pp. 161–173, <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>.

13. Clark J. S., Iverson L., Woodall C. W., Allen C. D., Bell D. M., Bragg D. C., D'Amato A. W., Davis F. W., Hersh M. H., Ibanez I., Jackson S. T., Matthews S., Pederson N., Peters M., Schwartz M. W., Waring K. M., Zimmermann N. E., The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States, *Global Change Biology*, 2016, Vol. 22, No. 7, pp. 2329–2352, <https://doi.org/10.1111/gcb.13160>.
14. Cobb R. C., Ruthrof K. X., Breshears D. D., Lloret F., Aakala T., Adams H. D., Anderegg W. R. L., Ewers B. E., Galiano L., Grünzweig J. M., Ecosystem dynamics and management after forest die-off: a global synthesis with conceptual state-and-transition models, *Ecosphere*, 2017, Vol. 8, Issue 12, Art. No. e02034, 17 p., <https://doi.org/10.1002/ecs2.2034>.
15. Cong D., Zhao S., Chen C., Duan Z., Characterization of droughts during 2001–2014 based on remote sensing: a case study of Northeast China, *Ecological Informatics*, 2017, Vol. 39, pp. 56–67, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.005>.
16. Hayes M. J., Svoboda M. D., Wilhite D. A., Vanyarkho O. V., Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index, *Bull. American Meteorological Society*, 1999, Vol. 80, No. 3, pp. 429–438.
17. Hou M., Venäläinen A. K., Wang L., Pirinen P., Gao Y., Jin S., Zhu Y., Qin F., Hu Y., Spatio-temporal divergence in the responses of Finland's boreal forests to climate variables, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, Vol. 92, Art. No. 102186, 9 p., DOI: 10.1016/j.jag.2020.102186.
18. IPCC, 2019: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.), WMO, UNEP, 2019, available at: <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
19. Javed T., Yao N., Chen X., Suon S., Li Y., Drought evolution indicated by meteorological and remote-sensing drought indices under different land cover types in China, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, Vol. 27, pp. 4258–4274, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06629-2>.
20. Kogan F. N., Global drought and flood-watch from NOAA polar-orbiting satellites, *Advances in Space Research*, 1998, Vol. 21, No. 3, pp. 477–480, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00883-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00883-1).
21. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Joanne H., Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, In: *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, G. Gutman, R. Volker (eds.), Springer Intern. Publ., 2017, pp. 173–192, DOI: 10.1007/978-3-319-42638-9_8.
22. Marumbwa F. M., An assessment of remote sensing-based drought index over different land cover types in southern Africa, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, No. 19, pp. 7368–7382, <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1757783>.
23. McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J., The relationship of drought frequency and duration to time scales, *8th Conf. Applied Climatology*, Boston: American Meteorological Society, 1993, pp. 179–184.
24. Santos G. M., Melendez-Pastor I., Navarro-Pedreno J., Koch M., Assessing Water Availability in Mediterranean Regions Affected by Water Conflicts through MODIS Data Time Series Analysis, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Issue 11, No. 1355, 20 p., <https://doi.org/10.3390/rs11111355>.
25. Tian F., Fensholt R., Verbesselt J., Grogan K., Horion S., Wang Y., Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 163, pp. 326–340, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.031>.
26. Qian X., Liang L., Shen Q., Sun Q., Zhang L., Liu Z., Zhao S., Qin Z., Drought trends based on the VCI and its correlation with climate factors in the agricultural areas of China from 1982 to 2010, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, Vol. 188, Issue 11, Art. No. 639, pp. 1–13, DOI: 10.1007/s10661-016-5657-9.
27. Zargar A., Sadiq R., Naser B., Khan F. I., A review of drought indices, *Environmental Reviews*, 2011, Vol. 19, No. NA, pp. 333–349, <https://doi.org/10.1139/a11-013>.