Статистический анализ временных рядов коротковолнового вегетационного индекса SWVI в задачах мониторинга постпирогенной динамики лесных экосистем

И. И. Кирбижекова, Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев, А. К. Балтухаев

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия
E-mail: kirbizhekiova@bk.ru

Представлены результаты статистического анализа многолетних (2000–2022) временных рядов коротковолнового вегетационного индекса SWVI (*англ.* Short-Wave Vegetation Index), полученных по данным спутников Landsat-5/8 с использованием облачной платформы GEE (*англ.* Google Earth Engine) для четырёх ключевых участков (сосновый молодняк на стадии постпирогенного восстановления, контрольные участки зрелого соснового и смешанного леса, открытый участок после деградации растительности). Цель работы — оценить информативность различных статистических характеристик SWVI для мониторинга постпирогенной динамики лесной растительности. Установлены статистически значимые тренды сближения усреднённых значений ($r^2 = 0{,}634$) и стандартного отклонения ($r^2 = 0{,}574$) SWVI участка лесовосстановления и контрольного соснового леса в скользящем годичном окне. Время достижения фонового уровня равно 26 и 37 лет соответственно. Показана постпирогенная динамика нормированных к допожарному уровню ежегодных показателей положения, рассеяния, асимметрии и эксцесса. Установлено, что среднегодовые и медианные значения SWVI восстанавливаются спустя 17–20 лет после пожара до 80–100 %, но характеристики рассеяния остаются повышенными до 200 % и более. Показатели асимметрии и эксцесса слабо реагируют на пирогенное воздействие, но чувствительны к качеству данных (полноте и равномерности распределения). Предложен метод визуализации сукцессионных траекторий на плоскости «среднегодовое значение – стандартное отклонение», позволяющий диагностировать стадии восстановления и деградации растительного покрова. Полученные результаты могут быть использованы при создании региональных систем спутникового мониторинга лесовосстановления и верификации углеродных бюджетов.

Ключевые слова: временные ряды SWVI, статистические характеристики, постпирогенное восстановление, лесная растительность, Google Earth Engine, Байкальский регион

Одобрена к печати: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-300-311

Введение

Антропогенное воздействие и рост числа аномальных климатических явлений ведут к масштабной деградации лесных экосистем. Ежегодная глобальная убыль лесов достигает порядка 10,9 млн га, а лесовосстановление компенсирует потери лишь частично (https://www.fao.org/forest-resources-assessment/ru). Для России и особенно для Республики Бурятия, где леса занимают 84,9 % территории, задача восстановления лесов, в том числе на обширных гарях, является государственным приоритетом.

Ведущим инструментом мониторинга постпирогенной динамики выступает анализ многолетних временных рядов спутниковых вегетационных индексов (Барталев и др., 2016; Богданов и др., 2020; Дмитриев и др., 2024; Aicardi et al., 2016; Bondur et al., 2022; Frazier et al., 2015; Gillespie et al., 2018). Среди них повышенной чувствительностью к содержанию влаги в растительности и величине фитомассы обладает коротковолновый вегетационный индекс SWVI (*англ.* Short-Wave Vegetation Index), основанный на контрасте каналов SWIR (*англ.* Short-Wave InfraRed) (1,4–3 мкм) и NIR (*англ.* Near-InfraRed) (0,75–1,4 мкм). В работах последних лет (Алексеев, Черниховский, 2024; Алексеева и др., 2022; Барталев и др., 2017; Белова, Ершов, 2015; Богданов и др., 2020; Гусев, 2021; Жирин и др., 2016; Остроухов, Клевцов, 2023; Стыценко и др., 2019; Тарасов и др., 2021; Тарасова и др., 2024; Токарева и др., 2021; Hu, 2020) подтверждена эффективность коротковолнового вегетационного индекса

SWVI при оценке последствий нарушений растительности. После пожаров его значения резко снижаются, а последующая положительная динамика отражает восстановление древесного полога; при этом в большинстве работ анализ ограничивается усреднёнными величинами SWVI. Информативность других статистических характеристик распределения этого индекса для количественного описания многолетней траектории лесовосстановления остаётся неизученной.

Цель исследования — выявить статистические закономерности постпирогенной динамики лесной растительности по многолетним временным рядам SWVI (Landsat-5/8) для репрезентативных участков Байкальского региона и оценить информативность различных характеристик распределения индекса для мониторинга стадий восстановления.

Материалы и методы

Тестовый полигон расположен в окрестностях г. Улан-Удэ (географические координаты: 107,64° в. д., 51,90° с. ш.). Территория исследования относится к зоне светлохвойных лесов с преобладанием сосны обыкновенной и лиственницы сибирской, с примесью берёзы и осины. Климат — резко континентальный, с холодной малоснежной зимой и тёплым умеренно влажным летом. Почвы — дерново-подзолистые и серые лесные.

Для анализа были выбраны четыре тестовых участка, различающихся по характеру растительного покрова и истории нарушений:

1. Участок постпирогенного лесовосстановления (сосновый молодняк) — холмистая территория площадью 69 га, пройденная верховым пожаром весной 2003 г. (между съёмками 29 марта и 7 апреля), в результате которого древостой был полностью уничтожен. В низинах и на пологих склонах была проведена расчистка и посадка саженцев сосны обыкновенной. В последующие годы здесь сформировался подрост сосны с примесью лиственных пород.

2. Контрольный участок зрелого ненарушенного соснового леса площадью 21 га, с сомкнутостью крон 0,7–0,8 и возрастом более 80 лет.

3. Контрольный участок ненарушенного смешанного леса площадью 9 га, спелый древостой с преобладанием лиственницы, берёзы и сосны.

4. Открытый безлесный участок площадью 14 га, который до пожара 2003 г. был покрыт сосновым лесом и в результате нескольких пожаров, расчистки и вырубки на протяжении 12 лет лишился древесной растительности (контрольный участок «поле»).

Детальная характеристика территории и участков приведена в опубликованных исследованиях (Bondur et al., 2022, 2024).

В настоящей работе использованы данные спутников Landsat-5 и Landsat-8 из архива GEE (*англ.* Google Earth Engine) за период 2000–2022 гг. Выбор обусловлен длительным периодом наблюдения, наличием необходимых спектральных каналов и свободным доступом. Общее количество составило 711 сцен. Для анализа отбирались сцены с облачностью менее 10 %. Доля пригодных для анализа съёмок достигла 55 % или 394 сцены. Отбор осуществлялся автоматизированно с использованием встроенных в GEE алгоритмов маскирования облаков CFMask (*англ.* C Function of Mask). Для каждого участка вычислялись средние значения спектральных каналов по всем пикселям, что позволило минимизировать влияние локальных неоднородностей.

Коротковолновый вегетационный индекс SWVI рассчитывался по формуле:

$$\mathrm{SWVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{SWIR}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{SWIR}},$$

где NIR и SWIR — коэффициенты отражения поверхности в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах длин волн соответственно.

Исходные временные ряды SWVI характеризуются высокой сезонной изменчивостью и неравномерной дискретизацией, обусловленной периодичностью съёмки и условиями облачности. Для выделения долговременных трендов была применена процедура скользящего усреднения с годичным окном, адаптированная к переменному числу наблюдений,

поскольку количество безоблачных сцен в разные годы варьировалось от 17 до 42 в год. Для текущей даты t среднее значение SWVI рассчитывалось по всем безоблачным сценам, попавшим в интервал [t–182, t+182 дня]. Наряду со скользящей средней СС для каждого годичного интервала рассчитывались: скользящее стандартное отклонение stdv (*англ.* standard deviation) как мера внутригодовой вариабельности и доверительные интервалы для среднего (при уровне значимости 0,95) на основе t-распределения Стьюдента.

Для количественной оценки скорости и времени приближения параметров участка лесовосстановления к фоновым (контрольный сосновый лес) на интервале 2003–2022 гг. были построены линейные регрессионные модели для двух показателей: 1) разности скользящих средних $dCC = CC_1 - CC_2$ (1 — подрост, 2 — контрольный сосновый лес); 2) отношения скользящего стандартного отклонения $ratio = stdv_1/stdv_2$. В качестве независимой переменной использовалось время t — количество лет после пожара ($t = 0$ для 01.01.2003). На основе полученных уравнений рассчитывалось прогнозное время выравнивания показателей ($dCC = 0$, $ratio = 1$) при условии постоянства скорости изменений. Достоверность аппроксимации оценивалась коэффициентом детерминации r^2, статистическая значимость — критерием Фишера.

Для детального анализа постпирогенной динамики на ежегодной основе вычислялись следующие статистики распределения SWVI: 1) показатели положения (среднее арифметическое, медиана, минимальное и максимальное значения); 2) показатели рассеяния (стандартное отклонение, вариации между значениями максимум – минимум); 3) показатели формы распределения (коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса). С целью сопоставимости все статистики были нормированы к соответствующим средним значениям за трёхлетний допожарный период (2000–2002) и выражены в процентах. Это позволило наглядно оценить постпирогенные отклонения на участке лесовосстановления от допожарного уровня и динамику последующего возврата к нему.

Для интегральной характеристики динамики состояния растительности и визуального сравнения разнонаправленных процессов восстановления и деградации предложен и апробирован метод построения двумерных траекторий на плоскости, где по осям откладываются характеристики положения и рассеяния и т. п.

Результаты

Анализ временных рядов SWVI для четырёх ключевых участков за период 2000–2022 гг. позволил выявить принципиальные различия в их многолетней динамике, обусловленные характером и историей нарушений. На *рис. 1* представлено для сравнения скользящее среднее СС и стандартное отклонение stdv для тестового и контрольных участков. На участке постпирогенного восстановления (1) можно выделить следующие основные этапы: допожарный квазистабильный этап (2000–2003); снижение СС вследствие пожара (2003); начальная стадия постпирогенного восстановления (2004–2011) и этап устойчивого роста SWVI (2013–2022). До пожара СС±stdv на исследуемом участке составляли в среднем 0,389±0,037 (вариация 9,4 %), что ближе к показателям контрольного соснового леса (2) 0,410±0,028 (6,7 %), чем к характеристикам смешанного леса (3) 0,286±0,029 (10,3 %). После пожара весной 2003 г. зафиксировано снижение СС до 0,04, сопровождавшееся увеличением амплитуды годичных колебаний в 2–3 раза (от 0,4 до 1). На начальной стадии восстановления (1–8 лет после пожара) тренд СС статистически не выражен на фоне значительных флуктуаций. На следующем этапе (10–19 лет после пожара) значения СС достигают 80–100 % от допожарного уровня, однако размах годичных флуктуаций остаётся повышенным.

Для контрольных участков леса (2 и 3) графики квазистабильны, а их флуктуации сильно зависят от облачности и режима проведения съёмок. В частности, наблюдаются скачкообразные изменения СС в периоды снижения количества безоблачных сеансов Landsat-5 до 17–20 сеансов/год в 2007–2008 гг. и в 2011 г. В это время из расчётов выпали летние высокие значения SWVI, что привело к понижению величин СС.

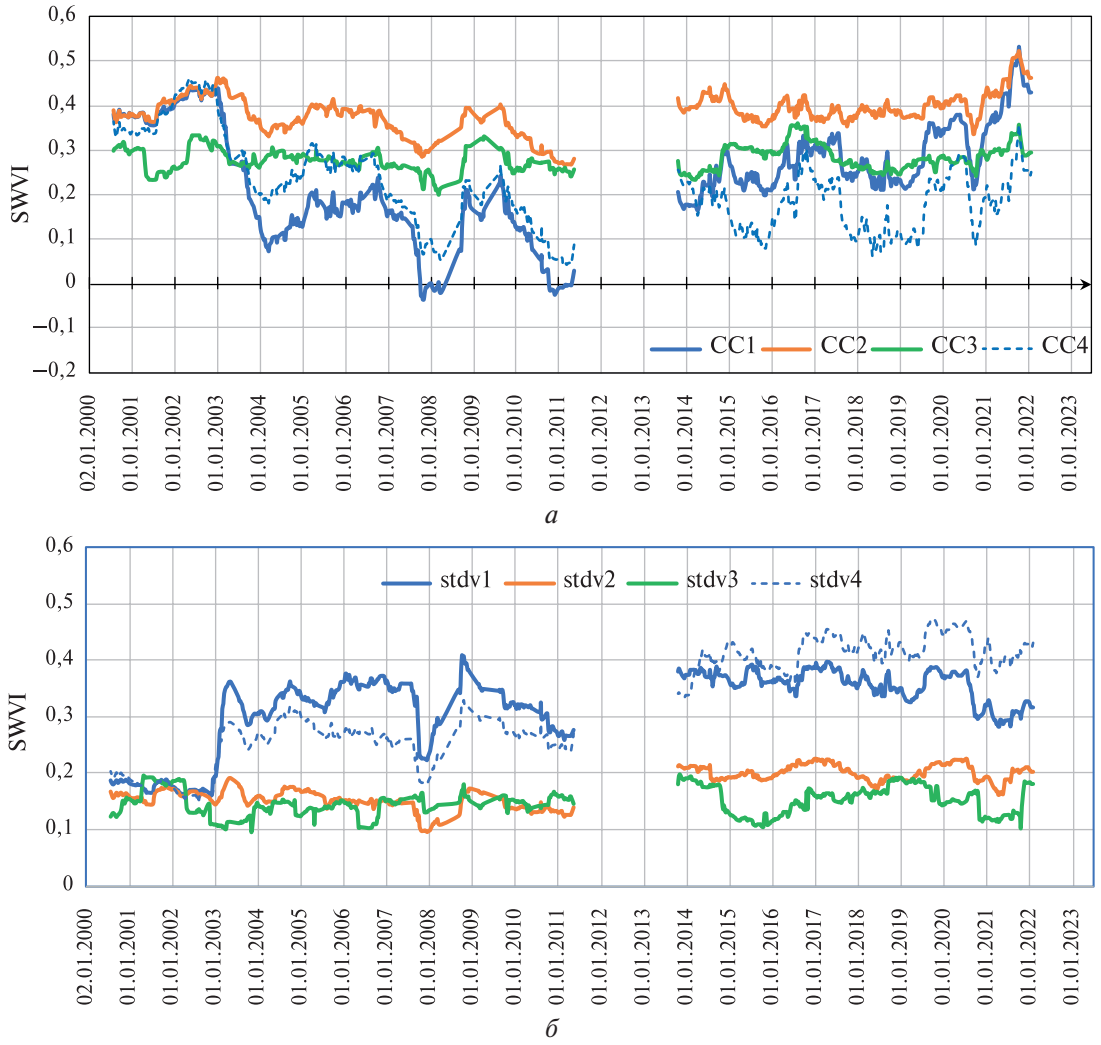


Рис. 1. Сравнение сглаженных коротковолновых индексов SWVI для тестового (1) и контрольных участков соснового леса (2), смешанного леса (3) и открытого участка (4): *а* — скользящее среднее; *б* — скользящее усреднённое стандартное отклонение

На участке 4 зафиксирована ступенчатая деградация СС SWVI: после пожара 2003 г. степень постпирогенного нарушения была слабее, чем на тестовом участке, а с 2015 г. после повторных пожаров и вырубки участок стал открытым, лишённым растительности с более низкими значениями СС SWVI и повышенными межгодичными вариациями (см. *рис. 1а*, *б*). На участке 4 характеристики СС SWVI в допожарный период 0,384±0,049 (12,6 %) также были близки к показателям соснового леса.

Динамика вариаций stdv существенно разнится на участках разного типа. Наибольший годичный разброс значений SWVI (0,40–0,47) наблюдается на открытом участке без растительности в 2015–2022 гг. (см. *рис. 1б*), наименьший на контрольных участках леса (0,10–0,22). В относительно влажные периоды вариации участков разного породного состава ненарушенного леса малоразличимы, но в засушливые годы (2003, 2015–2017) различия заметно возрастают. Характеристики годичного разброса SWVI соснового леса относительно устойчивы к засухе, а для смешанного леса в эти периоды наблюдается понижение stdv примерно на 0,10 (50 %). На тестовом участке до пожара годичные вариации stdv были порядка 0,16–0,18 и стабильны. После пожара произошёл резкий рост показателя до 0,30–0,40 и последующее медленное снижение. Спустя 20 лет после пожара величины разброса составляют не менее 0,28, что на 56–63 % выше допожарной нормы.

Для количественного описания процесса восстановления лесной растительности на участке подроста относительно фонового уровня (контрольного соснового леса) рассчитаны

линейные тренды разности CC и отношение скользящего стандартного отклонения на интервале 2003–2022 гг.:

1. Тренд разности dCC = 0,0106*t*–0,2757, с коэффициентом детерминации $r^2 = 0{,}6344$ (коэффициент корреляции $r = 0{,}796$). Положительный знак r свидетельствует о постепенном сближении значений CC SWVI восстанавливающегося участка и контрольного леса. При сохранении текущей скорости расчётное время выравнивания (dCC = 0) составляет 26 лет после пожара (2029 г.).

2. Тренд отношения скользящих стандартных отклонений ratio = 2,3221–0,0357*t*, с $r^2 = 0{,}5742$ ($r = -0{,}758$). Отрицательный знак коэффициента регрессии отражает постепенное снижение избыточной вариабельности SWVI на восстанавливающемся участке. Прогнозируемый период выхода на фоновый уровень контрольного соснового леса (ratio = 1) составляет 37 лет после пожара (2040 г.).

Оценка статистической значимости уравнений посредством критерия Фишера при $n = 324$ и уровнях значимости $\alpha = \{0{,}01;\ 0{,}05;\ 0{,}10\}$ дала положительный результат, так как расчётные значения критерия Фишера $F_{\text{расч}} = \dfrac{r^2}{1-r^2}(n-2)$, n — объём выборки, на порядок выше критических значений $F_{\text{крит}}(\mathrm{d}f_1 = 1{:}\mathrm{d}f_2 = n-2{:}\alpha)$, где d*f* (*англ.* degree of freedom) — степень свободы.

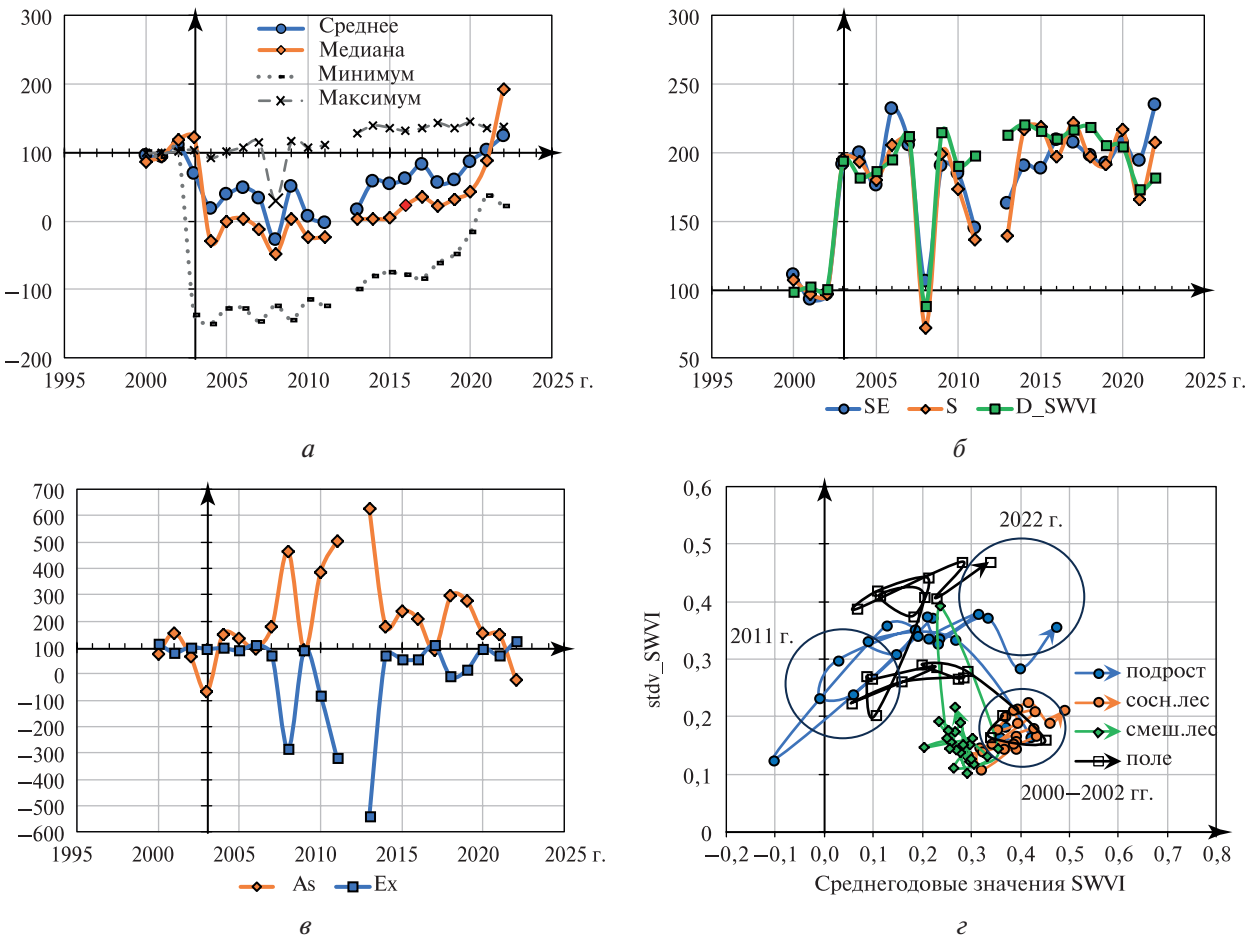


Рис. 2. Динамика статистических показателей (в %) индекса SWVI участка лесовосстановления, нормированных к среднему уровню до пожара: *а* — характеристики положения; *б* — характеристики рассеяния; *в* — асимметрия и эксцесс; *г* — совместная динамика на плоскости среднегодовых значений и стандартного отклонения индекса SWVI четырёх участков за период 2000–2022 гг.

На *рис. 2а–в* представлена динамика ежегодных статистических характеристик распределения SWVI на участке восстановления нормированных к среднему допожарному уровню (2000–2002). Средние и медианные значения индекса в первый год после пожара снижаются до 18 % и –30 % от допожарного уровня (100 %) соответственно (см. *рис. 2а*), затем растут, достигая 80–100 % спустя 17–20 лет. Минимальные и максимальные значения через 20 лет после пожара отличаются от допожарного уровня на 40–60 %. Характеристики рассеяния (стандартное отклонение *S*, стандартная ошибка SE (*англ.* Standard Error) и диапазон значений индекса D_SWVI) в год пожара возросли до 200 % и сохраняются на этом уровне на протяжении 20 лет после нарушения (см. *рис. 2б*), за исключением аномально низких значений в 2008 и 2011 гг., обусловленных влиянием облачности и перерыва съёмок. Низкие величины коэффициента детерминации $r^2 < 0{,}075$ указывают на статистическую незначимость трендов возврата ежегодных характеристик рассеяния к допожарному уровню. Данный факт свидетельствует о том, что для полного восстановления отражательных характеристик лесной растительности в инфракрасном диапазоне недостаточно простого зарастания территории: необходимо накопление биомассы и формирование вегетативного слоя достаточной толщины, что требует более продолжительного времени (десятилетия). Характеристики третьего и четвёртого порядков (см. *рис. 2в*) демонстрируют отсутствие устойчивых изменений после пожара. Кратковременное снижение коэффициента асимметрии, зафиксированное в год пожара, не считается показательным, поскольку последующая динамика данных характеристик в большей степени определяется аномальными условиями съёмки, вариабельностью облачности, неравномерностью временных рядов и наличием пропусков в данных. Указанная особенность может быть использована для индикации и последующего исключения аномальных выбросов либо для коррекции их влияния за счёт применения понижающих весовых коэффициентов при обработке временных рядов.

Динамика процессов роста и деградации лесной растительности может быть представлена посредством траекторий тестового и контрольных участков на плоскости пары статистик, например «среднегодовое значение SWVI – стандартное отклонение» на *рис. 2г*. Стрелки на временных треках *рис. 2г* указывают направление долговременных изменений соответствующих характеристик SWVI исследуемых участков. Как видно по графику, сосновый и смешанный лес формируют на плоскости две компактные, близко расположенные области. Для соснового леса эта область характеризуется средними значениями 0,28–0,49 и стандартным отклонением 0,11–0,23; для смешанного леса соответственно 0,20–0,36 и 0,10–0,22. Временные треки тестового участка и участка поле демонстрируют послепожарные процессы деградации и частичного восстановления леса: смещение траектории в область нулевых и отрицательных среднегодовых величин SWVI с высокими показателями рассеяния. По мере зарастания территории и развития молодняка фиксируется приближение среднегодовых значений индекса к уровню контрольного соснового леса. Однако вследствие значительных сезонных вариаций отражательных характеристик в коротковолновом инфракрасном диапазоне, обусловленных относительно малой толщиной вегетативного слоя и невысокой биомассой молодого подроста, точки временного трека на плоскости располагаются выше от исходной области, соответствующей зрелому лесу. Предполагается, что по мере дальнейшего роста и накопления надземной фитомассы будет происходить снижение сезонной вариабельности индекса SWVI и соответственно спуск траектории в исходную область.

Обсуждение результатов

Проведённое исследование показало, что многолетние временные ряды коротковолнового вегетационного индекса SWVI, рассчитанные по данным спутников Landsat, содержат ценную информацию не только о факте нарушения лесного покрова, но и о скорости и полноте его последующего восстановления. При этом ключевым результатом работы становится количественное подтверждение того, что различные статистические характеристики индекса

SWVI по-разному реагируют на постпирогенную динамику лесного подроста и имеют неодинаковое время возврата к фоновым значениям.

Различие скорости восстановления средних значений и характеристик рассеяния свидетельствует о том, что нормализация среднего уровня индекса происходит быстрее, чем стабилизация его внутригодовой вариабельности. Данный феномен можно интерпретировать следующим образом: на начальных этапах восстановления (первые 10–15 лет) происходит зарастание гари травянистой растительностью, кустарниками и лиственным подростом, что обеспечивает относительно высокие средние значения SWVI благодаря влагосодержанию трав и листвы. Однако структурные характеристики древесного полога — сомкнутость крон, вертикальная неоднородность, накопление фитомассы хвойных пород — остаются далёкими от параметров зрелого леса, что проявляется в высокой сезонной изменчивости отражательных свойств. Молодой подрост с несомкнутыми кронами и значительной долей напочвенного покрова создаёт пёструю мозаику условий увлажнения и затенения, что и обусловливает повышенную дисперсию SWVI в течение года.

Сопоставление полученных оценок с литературными данными показывает, что время восстановления среднегодовых значений SWVI (17–20 лет) до 80–100%-го уровня среднестатистической нормы допожарного периода близко к периоду аналогичного восстановления среднегодовых значений NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), который по разным оценкам составляет 15–20 лет при схожих условиях (Белова, Ершов, 2015; Богданов и др., 2018; Bondur et al., 2022). Это объясняется тем, что оба индекса чувствительны к наличию фотосинтезирующей растительности, которая появляется уже в первые годы после пожара. Однако SWVI, в отличие от NDVI, дополнительно реагирует на влагосодержание тканей, что делает его более информативным для оценки состояния древесного яруса на более поздних стадиях сукцессии.

Время постпирогенного приближения CC SWVI (26 лет) к фоновым значениям CC SWVI контрольного соснового леса аналогично времени восстановления среднего значения NDVI зимнего периода (27 лет), в оценке которого был исключён вклад быстрорастущей травянистой, кустарниковой и лиственной растительности, что подтверждает перспективность применения данного показателя для мониторинга сомкнутости полога хвойного леса. Разница времени восстановления допожарного и текущего фонового уровней SWVI и CC SWVI (6 лет) обусловлена понижением индекса в засушливый период 2000–2002 гг., а также адаптивностью к межгодичной изменчивости условий наблюдения при втором подходе. Полученная оценка времени фазового перехода «нелес – лес» выше в 2–3 раза аналогичных оценок по другим российским регионам (Белова, Ершов, 2015; Богданов и др., 2018; Карпов и др., 2019), что в основном связано с высокой степенью пирогенного воздействия и более суровыми климатическими условиями на исследуемой территории, а также различием расчётных временных интервалов.

Прогнозное время снижения избыточной вариабельности до фонового уровня (37 лет) согласуется с оценками, полученными для радарного индекса RVI (*англ.* Radar Vegetation Index) (41 год), и ниже оценок для индекса dpRVI (*англ.* Dual polarimetric Radar Vegetation Index) (60–90 лет) по поляриметрическим данным ALOS (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (*англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) (Bondur et al., 2024). Это подтверждает высказанное ранее предположение о том, что параметры рассеяния индекса SWVI чувствительны к вертикальной структуре полога и влагосодержанию объёмной фитомассы и могут служить индикаторами восстановления биомассы и сомкнутости древостоя.

Показатели третьего и четвёртого порядков (коэффициенты асимметрии и эксцесса) продемонстрировали слабую реакцию на пирогенное воздействие, но высокую чувствительность к качеству исходных данных — пропускам, вызванным облачностью, и неравномерности временных рядов. Это позволяет рассматривать их как диагностические инструменты для выявления аномалий в самих данных, отклонения от нормального вида распределения. Например, резкие изменения асимметрии или эксцесса могут сигнализировать о том, что в выборку попали не репрезентативные наблюдения. В дальнейшем это свойство может быть использо-

вано для разработки адаптивных алгоритмов фильтрации выбросов или взвешивания наблюдений при построении композитных изображений и временных рядов.

Предложенный в работе метод визуализации траекторий участков на плоскости «среднее – стандартное отклонение» позволяет наглядно представить разнонаправленные процессы восстановления и деградации растительности. Компактное расположение контрольных лесных участков в определённой области фазового пространства даёт возможность количественно определить критерии зрелого леса по сочетанию статистических характеристик SWVI. Выход траектории за пределы этих областей указывает на наличие нарушений или незавершённость восстановительных процессов. На примере участка поле показано, что деградация растительности также чётко отражается на двумерной диаграмме: переход в область низких средних значений SWVI и высокого стандартного отклонения после полного уничтожения растительности. Это открывает возможность использования подобных диаграмм для мониторинга не только восстановления, но и деградации лесных земель, включая процессы опустынивания, эрозии и антропогенной трансформации.

Важный методический результат работы заключается в выявлении зависимости статистических оценок от регулярности съёмки и условий облачности. Периоды с низкой частотой безоблачных наблюдений (менее 20 сцен в год) приводят к смещению среднегодовых оценок и появлению ложных трендов, что особенно заметно на контрольных лесных участках в 2007–2008 и 2011 гг. Это подчёркивает необходимость осторожной интерпретации временных рядов, полученных по данным Landsat-5 в регионах с высокой облачностью, и обосновывает предпочтительность использования композитных данных или методов, устойчивых к неравномерной дискретизации, таких как адаптивное скользящее среднее, применённое в настоящей работе.

К ограничениям исследования следует отнести относительно небольшое количество тестовых участков (четыре), что не позволяет экстраполировать полученные количественные оценки на всё разнообразие лесорастительных условий Байкальского региона. Кроме того, прогнозные оценки времени восстановления (26 и 37 лет) основаны на предположении о линейности трендов, тогда как реальная сукцессионная динамика может иметь нелинейный характер, особенно на завершающих этапах. Для уточнения этих оценок необходимы более длительные ряды наблюдений и включение дополнительных участков с различными типами леса и разной историей нарушений.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами других авторов о более высокой информативности индексов, использующих коротковолновый инфракрасный диапазон, по сравнению с классическим NDVI. В работах (Барталев и др., 2017; Стыценко и др., 2019) показано, что SWVI и NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) эффективнее для оценки степени повреждения лесов пожарами и последующего восстановления. Наше исследование дополняет эти выводы количественными характеристиками скорости восстановления различных статистических параметров индекса. Сопоставление с радарными индексами RVI и dpRVI (Bondur et al., 2024) показывает, что SWVI занимает промежуточное положение по времени восстановления: быстрее, чем радарные индексы, но медленнее, чем NDVI. Это делает его удобным компромиссным инструментом для мониторинга, позволяющим оценивать не только факт зарастания, но и степень сформированности древесного полога.

Разработанный подход может быть использован в региональных системах мониторинга лесовосстановления для количественной оценки степени восстановления лесных участков после пожаров и рубок; выявления участков с замедленным восстановлением, требующих лесохозяйственного вмешательства; верификации углеродных бюджетов и отчётности по поглощению парниковых газов; картографирования стадий сукцессии на основе статистических характеристик временных рядов. Особую ценность представляет предложенный метод визуализации траекторий, который позволяет оперативно оценивать состояние больших массивов участков по их положению в фазовом пространстве статистических признаков, что легко автоматизируется в среде GEE.

Заключение

В результате исследований динамики статистических характеристик многолетних (2000–2022) временных рядов коротковолнового вегетационного индекса SWVI по данным спутников Landsat-5/8 для ключевых участков Байкальского региона:

1. Выявлены существенные различия скорости постпирогенного восстановления ежегодных характеристик 1-го и 2-го порядков. Динамика характеристик рассеяния точнее отражает процесс формирования сомкнутого древесного полога и накопление биомассы хвойных пород, в то время как динамика характеристик положения ускорена из-за влияния травы и лиственного подроста. Показатели 3-го и 4-го порядков (коэффициенты асимметрии и эксцесса) продемонстрировали низкую чувствительность к постпирогенным изменениям, но высокую — к отклонениям от нормального распределения исходных данных.
2. Установлены тренды и время сближения усреднённых значений и стандартных отклонений SWVI в скользящем годичном окне тестового участка и контрольного соснового леса. Уравнения линейной регрессии разности скользящих средних $CC_1 - CC_2 = 0{,}0106t - 0{,}2757$ ($r^2 = 0{,}634$; $r = 0{,}796$) и отношения стандартных отклонений $stdv_1/stdv_2 = 2{,}3221 - 0{,}0357t$ ($r^2 = 0{,}574$; $r = 0{,}758$). Прогнозное время достижения фоновых параметров составляет 26 и 37 лет после пожара соответственно, что сопоставимо с аналогичными показателями для NDVI зимнего периода (27 лет) и для RVI (41 год) и подтверждает перспективность использования статистических характеристик SWVI для долговременного мониторинга постпирогенного восстановления лесной растительности.
3. Предложен метод визуализации сукцессионных траекторий на плоскости «среднегодовое значение SWVI – стандартное отклонение», позволяющий наглядно дифференцировать стадии восстановления и деградации растительного покрова. Определены области фазового пространства, соответствующие зрелым сосновым и смешанным лесам Байкальского региона. Показано, что выход траектории за пределы этих областей индицирует наличие нарушений или незавершённость восстановительных процессов.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 26-27-20057 «Создание прототипа геоинформационной системы долговременного дистанционного оптико-микроволнового мониторинга изменений леса на примере участков центральной экологической зоны».

Литература

1. *Алексеев А. С.*, *Черниховский Д. М.* Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2024. № 2. С. 11–28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.
2. *Алексеева М. Н.*, *Русских И. В.*, *Ященко И. Г.*, *Кадычагов П. Б.* Наземно-дистанционные исследования постпирогенных ландшафтов Томской области // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7 (402). С. 539–548. DOI: 10.15372/AOO20220704.
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. Стыценко Ф. В.*, *Хвостиков С. А.*, *Лупян Е. А.* Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. *Белова Е. И.*, *Ершов Д. В.* Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.
6. *Богданов А. П.*, *Карпов А. А.*, *Демина Н. А.*, *Алешко Р. А.* Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесоуправления // Совре-

менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 89–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100.
7. *Богданов А. П.*, *Карпов А. А.*, *Воронин В. В.*, *Алешко Р. А.* Анализ возможностей применения разновременных данных дистанционного зондирования Земли для оценки лесовосстановления // Тр. Санкт-Петербургского научно-исслед. ин-та лесного хоз-ва. 2020. № 1. С. 44–53.
8. *Гусев А. П.* Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7. № 2. С. 202–209.
9. *Дмитриев А. В.*, *Кирбижекова И. И.*, *Чимитдоржиев Т. Н.* Анализ возможности применения радарного индекса DpRVI для оценки лесовосстановления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 173–187. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-173-187.
10. *Жирин В. М.*, *Князева С. В.*, *Эйдлина С. П.* Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14.
11. *Карпов А. А.*, *Пирцхалава-Карпова Н. Р.*, *Богданов А. П.*, *Алешко Р. А.*, *Воронин В. В.* Разработка методики для перевода лесных земель в покрытые лесом земли дистанционными методами // Сибирский лесной журн. 2019. № 6. С. 19–26.
12. *Остроухов А. В.*, *Клевцов Д. Р.* Информативность вегетационных индексов для оценки послерубочного восстановления темнохвойных лесов Северного Сихотэ-Алиня по данным со спутников серии Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 194–204. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-194-204.
13. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Букась А. В. и др.* Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
14. *Тарасов А. В.*, *Шихов А. Н.*, *Шабалина Т. В.* Распознавание нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам Sentinel-2 с помощью свёрточных нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 51–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.
15. *Тарасова Л. В.*, *Курбанов Э. А.*, *Воробьёв О. Н. и др.* Мониторинг лесного покрова водоохранных зон рек Марий Эл по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 177–195. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195.
16. *Токарева О. С.*, *Алшаиби А. Д. А.*, *Пасько О. А.* Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 191–199. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3283.
17. *Aicardi I.*, *Garbarino M.*, *Lingua A. et al.* Monitoring post-fire forest recovery using multi-temporal digital surface models generated from different platforms // EARSeL eProceedings. 2016. V. 15. No. 1. 8 p. DOI: 10.12760/01-2016-1-01.
18. *Bondur V.*, *Chimitdorzhiev T.*, *Kirbizhekova I.*, *Dmitriev A.* Estimation of postfire reforestation with SAR polarimetry and NDVI time series // Forests. 2022. V. 13. No. 5. Article 814. DOI: 10.3390/f13050814.
19. *Bondur V.*, *Chimitdorzhiev T.*, *Kirbizhekova I.*, *Dmitriev A.* A novel method of boreal zone reforestation/afforestation estimation using Palsar-1,2 and Landsat-5, 8 data // Forests. 2024. V. 15. No. 1. Article 132. DOI: 10.3390/f15010132.
20. *Frazier R. J.*, *Coops N. C.*, *Wulder M. A.* Boreal Shield forest disturbance and recovery trends using Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 170. P. 317–327. DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.015.
21. *Gillespie T. W.*, *Ostermann-Kelm S.*, *Dong C. et al.* Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California // Ecological Indicators. 2018. No. 88. P. 485–494. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.031.
22. *Hu Y.*, *Hu Y.* Detecting forest disturbance and recovery in Primorsky Krai, Russia, using annual Landsat time series and multi-source land cover products // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 1. Article 129. DOI: 10.3390/RS12010129.

Statistical analysis of Short-Wave Vegetation Index (SWVI) time series in tasks of monitoring post-pyrogenic dynamics of forest ecosystems

I. I. Kirbizhekova, T. N. Chimitdorzhiev, A. V. Dmitriev, A. K. Baltukhaev

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia
E-mail: kirbizhekiova@bk.ru

The article presents the results of a statistical analysis of a long-term (2000–2022) time series of SWVI (Short-Wave Vegetation Index) obtained from Landsat-5/8 satellites using the GEE (Google Earth Engine) cloud platform for four key sites: pine saplings at the stage of post-pyrogenic restoration, control areas of mature pine and mixed forests, an open area after vegetation degradation. The aim of the work is to evaluate the informative value of various statistical characteristics of SWVI for monitoring the post-pyrogenic dynamics of forest vegetation. Statistically significant trends of convergence of the average values ($r^2 = 0.634$) and standard deviations ($r^2 = 0.574$) of SWVI of the reforestation site and the control pine forest in a sliding annual window have been established. The time to reach the background level is 26 and 37 years, respectively. The post-pyrogenic dynamics of annual position, scattering, asymmetry, and kurtosis indicators normalized to the pre-fire level is shown. It was found that the average annual and median SWVI values recover 17–20 years after the fire to 80–100 %, but the scattering characteristics remain elevated to 200 % or more. The indicators of skewness and kurtosis react poorly to pyrogenic effects, but they are sensitive to data quality (completeness and uniformity of distribution). A method for visualizing succession trajectories on the "average annual value – standard deviation" plane is proposed, which makes it possible to diagnose the stages of restoration and degradation of vegetation cover. The results obtained can be used in the creation of regional satellite monitoring systems for reforestation and verification of carbon budgets.

Keywords: SWVI time series, statistical characteristics, post-pyrogenic recovery, forest vegetation, Google Earth Engine, Baikal region

Accepted: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-300-311

References

1. Alekseev A. S., Chernikhovskiy D. M., Identification of damage to coniferous stands based on comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveys, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2024, No. 2, pp. 11–28 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.
2. Alekseeva M. N., Russkikh I. V., Yashchenko I. G., Kadychagov P. B., Ground-based remote studies of post-pyrogenic landscapes of the Tomsk region, *Optika atmosfery i okeana*, 2022, V. 35, No. 7 (402), pp. 539–548 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20220704.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
4. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Belova E. I., Ershov D. V., Assessing reforestation on clear cuts based on Landsat time series, *Lesovedenie*, 2015, No. 5, pp. 339–345 (in Russian).
6. Bogdanov A. P., Karpov A. A., Demina N. A., Aleshko R. A., Improving forest monitoring by using cloud technologies as an element of sustainable forest management, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 1, pp. 89–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100.
7. Bogdanov A. P., Karpov A. A., Voronin V. V., Aleshko R. A., Possibilities analysis of using remote method for evaluating forest recovery using remote sensing data of the Earth, *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*, 2020, No. 1, pp. 44–53 (in Russian).
8. Gusev A. P., Long-term changes in vegetation indices as an indicator of the dynamics of the state of natural and anthropogenic geosystems, *Geopolitika i ehkogeodinamika regionov*, 2021, V. 7, No. 2, pp. 202–209 (in Russian).

9. Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Analysis of the Dual-pol Radar Vegetation Index potential for reforestation assessment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 173–187 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-173-187.
10. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eydlina S. P., Long-term dynamics of vegetation indices in dark coniferous forest after Siberian moth disturbance, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, V. 9, No. 7, pp. 834–843, DOI: 10.1134/S1995425516070118.
11. Karpov A. A., Pirtskhalava-Karpova N. R., Bogdanov A. P., Aleshko R. A., Voronin V. V., Development of a method for transferring forest lands to forest cover lands by remote sensing methods, *Sibirskii Lesnoi Zhurnal*, 2019, No. 6, pp. 19–26 (in Russian).
12. Ostroukhov A. V., Klevtsov D. R., Informativeness of vegetation indices in assessing post-cutting restoration of dark coniferous forests in Northern Sikhote-Alin according to data from Landsat series satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 194–204 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-194-204.
13. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Bukas A. V. et al., The possibilities of prolonged burnt severity assessment of evergreen coniferous forest using multi-spectral satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 217–227 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
14. Tarasov A. V., Shikhov A. N., Shabalina T. V., Detection of forest disturbances in Sentinel-2 images with convolutional neural networks, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 51–64 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.
15. Tarasova L. V., Kurbanov E. A., Vorobiev O. N. et al., Monitoring forest cover in riparian zones along the rivers of Mari El Republic using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 177–195 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195.
16. Tokareva O. S., Alshaibi A. D. A., Pasko O. A., Assessment of restoration dynamics of burnt forest area vegetation using Landsat satellite data, *Bull. Tomsk Politechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, V. 332, No. 7, pp. 191–199 (in Russian), DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3283.
17. Aicardi I., Garbarino M., Lingua A. et al., Monitoring post-fire forest recovery using multi-temporal digital surface models generated from different platforms, *EARSeL eProceedings*, 2016, V. 15, No. 1, 8 p., DOI: 10.12760/01-2016-1-01.
18. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A., Estimation of postfire reforestation with SAR polarimetry and NDVI time series, *Forests*, 2022, V. 13, No. 5, Article 814, DOI: 10.3390/f13050814.
19. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A., A novel method of boreal zone reforestation/afforestation estimation using Palsar-1,2 and Landsat-5,8 data, *Forests*, 2024, V. 15, No. 1, Article 132, DOI: 10.3390/f15010132.
20. Frazier R. J., Coops N. C., Wulder M. A., Boreal Shield forest disturbance and recovery trends using Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2015, V. 170, pp. 317–327, DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.015.
21. Gillespie T. W., Ostermann-Kelm S., Dong C. et al., Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California, *Ecological Indicators*, 2018, No. 88, pp. 485–494, DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.031.
22. Hu Y., Hu Y., Detecting forest disturbance and recovery in Primorsky Krai, Russia, using annual Landsat time series and multi-source land cover products, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 1, Article 129, DOI: 10.3390/RS12010129.