

Информативность вегетационных индексов для оценки послерубочного восстановления темнохвойных лесов Северного Сихотэ-Алиня по данным со спутников серии Landsat

А. В. Остроухов¹, Д. Р. Клевцов²

¹ *Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: Ostran2004@bk.ru*

² *Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, 680035, Россия
E-mail: Klevtsov030@gmail.com*

На примере крупного массива темнохвойных (елово-пихтовых) лесов на территории Ванинского и Советско-Гаванского районов Хабаровского края общей площадью 34 тыс. га с 43-летней историей лесохозяйственного освоения проанализирована возможность применения ряда вегетационных индексов для оценки динамики возобновления коренной растительности. На основе обработки долговременной серии (1980–2023) спутниковых данных Landsat-3...-9, экспедиционных материалов и данных аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата была разработана карта современного состояния растительности и истории лесохозяйственного освоения территории исследований. Рассчитанные вегетационные индексы NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index), SWVI (*англ.* Shortwave Vegetation Index), BSFI (*англ.* Bi-Seasonal Forest Index) проанализированы с точки зрения их применимости для оценки послерубочной динамики темнохвойных лесов. Результаты отражают слабую пригодность индексов NDVI и EVI для этих целей, что обусловлено как спецификой объекта изучения, так и пространственным разрешением полученных материалов. Индексы BSFI и SWVI, хотя и в большей степени отражают динамику растительного покрова, но сохраняют недостатки, связанные с существенным разбросом значений из-за специфики восстановления темнохвойных лесов, что затрудняет интерпретацию данных.

Ключевые слова: вегетационные индексы, NDVI, EVI, SWVI, BSFI, Landsat-8, лесовосстановление, пихтово-еловые леса, Северный Сихотэ-Алинь

Одобрена к печати: 04.10.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-194-204

Введение

Одно из обязательных условий обеспечения устойчивого лесопользования на территории России — наличие оперативных данных о современном состоянии и динамике лесов. Это в условиях огромных слабо освоенных территорий Сибири и Дальнего Востока в совокупности с высокой стоимостью лесоустроительных работ предполагает широкое применение данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) (Барталев и др., 2016; Жирин и др., 2011). К настоящему времени в мире и России накоплен большой опыт использования спутниковых данных для изучения состояния и динамики растительного покрова, главным образом для глобального и регионального уровня детализации (Куулар, 2020; Малинников, Барталев, 2006; Frost et al., 2014). Наряду с композитными изображениями и результатами их классификации для этих целей активно применяются производные данные в виде различных вегетационных индексов. Имеющиеся работы отражают высокую информационную значимость ряда распространённых индексов, таких как нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), коротковолновый вегетационный индекс SWVI (*англ.* Shortwave Vegetation Index), для оценки современного состояния лесов и их динамики под влиянием пожаров, загрязнения атмосферы, повреждений вредителями и др. (Верхотуров и др., 2020; Воробьев, Курбанов, 2017; Мелкий и др., 2020; Стыценко и др., 2019; Туктамышев и др., 2021; Miles, Esau, 2016; Zhirin et al., 2016). В то же время анализу после-

рубочной динамики лесного покрова посвящено меньшее количество работ, главным образом на региональном уровне для европейской территории России и Западной Сибири (Барталев и др., 2005; Белова, Ершов, 2019; Краснощеков и др., 2019; Швецов, Пономарев, 2021).

Хабаровский край, как и Дальний Восток России в целом, в настоящее время сохраняет ресурсную ориентацию природопользования, в том числе связанную с заготовкой древесины. Несмотря на некоторые изменения в структуре производства, край в 2020 г. обеспечил 6,9 % (3-е место) экспорта лесной продукции из России (Шум, 2021). Хотя в последние годы наблюдаются пространственные сдвиги лесозаготовительной деятельности в северную часть центральных районов края, южные районы края в пределах Северного Сихотэ-Алиня по-прежнему остаются зоной наиболее интенсивных лесозаготовок (Лесной план Хабаровского края на 2019–2028 годы. Утверждён Постановлением Губернатора Хабаровского края от 31.01.2019 № 5, <https://laws.khv.gov.ru/api/cs-service/containers/ffade1de-d11f-46d3-8130-35c1484a932c/view>). К таким районам относятся Ванинский и Советско-Гаванский муниципальные районы Хабаровского края, расположенные на восточном макросклоне Северного Сихотэ-Алиня. Интенсивное хозяйственное развитие данной территории определено близостью лесосырьевых баз к крупнейшим портам Хабаровского края, наличием автомобильной и железной дорог, что позволило сформировать крупный Ванинско-Советско-Гаванский промышленный узел. Так, по состоянию на 2021 г. на долю эксплуатационных лесов приходится 71,5 % территории районов (в том числе в аренде 68,6 %) (Леса высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ) Хабаровского края, <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-khab>). Максимальному воздействию лесозаготовок на данной территории подвергаются темнохвойные леса из ели аянской (*лат. Picea jezoensis*) и пихты белокорой (*лат. Abies nephrolēpis*) (Климина, Остроухов, 2022), тогда как пространственных данных о возобновлении темнохвойных лесов в условиях Дальнего Востока недостаточно.

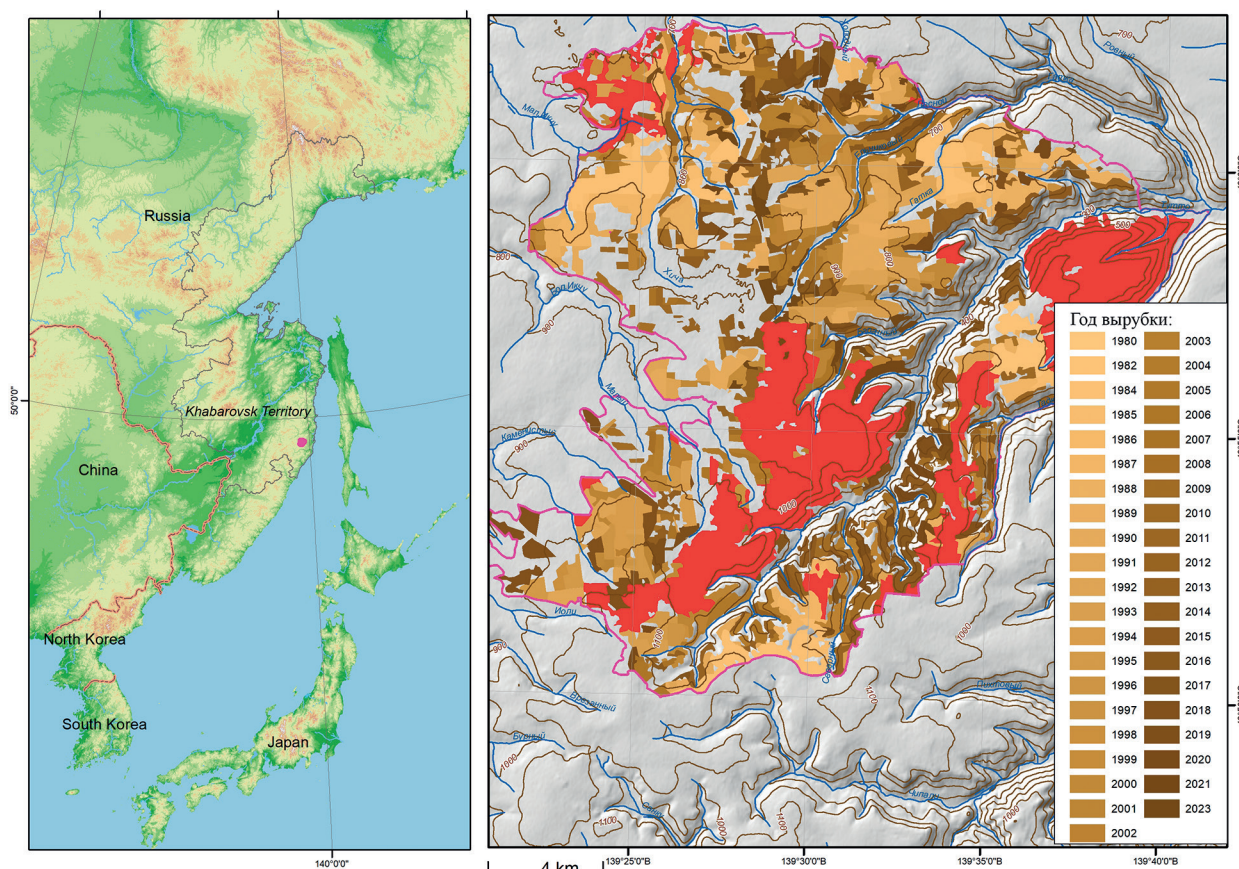


Рис. 1. Положение района исследований и территории, пройденные рубками разных лет (оттенки коричневого) и пожарами (красный)

В работе на примере крупного массива темнохвойных (елово-пихтовых) лесов на территории Ванинского и Советско-Гаванского районов Хабаровского края (рис. 1, см. с. 195), расположенного на восточном макросклоне Северного Сихотэ-Алиня, общей площадью 34 тыс. га, с 43-летней историей лесохозяйственного освоения проанализирована возможность применения ряда вегетационных индексов для оценки динамики возобновления коренной растительности после лесозаготовок.

Район работ находится в пределах среднерасчленённого базальтового плато на высотах 700–1100 м. Водоразделы плоские, частично заболоченные, долины рек в верховьях слабо выражены, в среднем течении врезанные (на глубину 300–350 м), с крутыми (до 45°) склонами. Коренная растительность представлена преимущественно елово-пихтовыми лесами, в меньшей степени — елово-лиственничными и лиственничными лесами заболоченных водоразделов и истоков рек.

Материалы и методы

Исходными материалами послужили данные ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения (Landsat-3...-9, Sentinel-2, ArcGIS Imagery) с 1980 по 2023 г., экспедиционные материалы и данные аэрофотосъёмки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). На основе разновременных снимков со спутников серии Landsat (Landsat-3 — 2 снимка, Landsat-4 — 1 снимок, Landsat-5 — 26 снимков, Landsat-7 — 16 снимков, Landsat-8 — 11 снимков, Landsat-9 — 2 снимка), Sentinel-2 определялся возраст вырубki, а данные высокого пространственного разрешения сервиса ArcGIS Imagery использовались для уточнения границ рубок и экспертного дешифрирования растительного покрова пройденных рубками и пожарами участков.

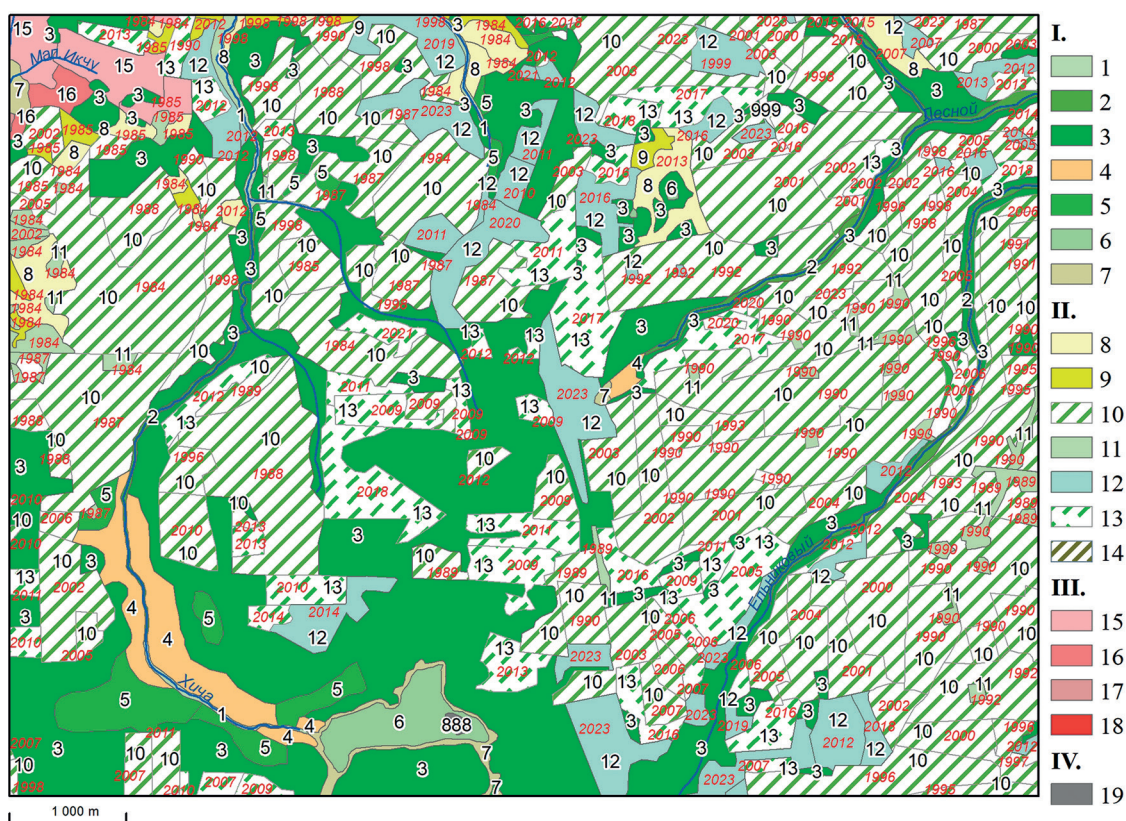


Рис. 2. Карта современного состояния растительности и истории лесохозяйственного освоения территории лесного массива (фрагмент). Условные обозначения см. в табл. 1. Индексы красного цвета показывают год вырубki

На основе анализа долговременной серии спутниковых данных была разработана карта современного состояния растительности и истории лесохозяйственного освоения территории лесного массива. На ней отражены сохранившиеся коренные сообщества, контуры рубок и пожаров разных лет и характеристика производных растительных сообществ (табл. 1, рис. 2, см. с. 196).

Таблица 1. Площади растительных сообществ района исследований

Индекс	Растительные сообщества	Площадь	
		га	%
<i>I. Неизменённые территории</i>		<i>10731,9</i>	<i>31,6</i>
1	Пойменные ивово-тополевые леса с участками закустаренных лугов	87,1	0,26
2	Пойменные елово-пихтовые разнотравно-зеленомошные леса	592,6	1,75
3	Елово-пихтовые зеленомошные леса	9196,2	27,08
4	Лиственничники багульниково-вейниковые	146,3	0,43
5	Смешанные леса	479,4	1,41
6	Болота травяно-мохово-кустарничковые	99,8	0,29
7	Лиственничные мари	130,6	0,39
<i>II. Территории, затронутые лесохозяйственной деятельностью</i>		<i>16468,0</i>	<i>48,5</i>
8	Лугово-кустарниковые сообщества с единичными деревьями ели, пихты, берёзы белой, лиственницы	436,1	1,28
9	Лугово-кустарниковые сообщества с елово-пихтово-берёзово-лиственничным редколесьем	296,9	0,87
10	Полосы елово-пихтового леса с примесью берёзы и лугово-кустарниковыми сообществами по волокам	7808,3	23,0
11	Молодые сомкнутые лиственнично-берёзовые леса	353,5	1,04
12	Лугово-кустарниковые сообщества	3815,7	11,24
13	Лугово-кустарниковые сообщества с узкими полосами смешанного леса	3045,8	8,97
14	Полосы молодого лиственнично-берёзово-душекиевского леса с лугово-кустарниковыми сообществами по волокам	706,9	2,08
<i>III. Гари</i>		<i>6799,5</i>	<i>20,03</i>
15	Лугово-кустарниковые сообщества с единичными деревьями ели, пихты, берёзы белой, лиственницы	330,4	0,97
16	Лугово-кустарниковые сообщества с елово-пихтово-берёзово-лиственничным редколесьем	205,9	0,61
17	Молодые сомкнутые лиственнично-берёзовые леса	353,7	1,04
18	Вейниково-малиново-кипрейные луговые сообщества	5869,3	17,29
<i>IV. Иное</i>		<i>2,8</i>	<i>0,008</i>
19	Минеральные поверхности складов и посёлков	2,8	0,008
<i>Итого</i>		<i>33954,5</i>	<i>100</i>

Анализ полученных материалов показывает, что за 43-летнюю историю лесохозяйственного освоения сохранилось лишь 31,6 % исходного лесного массива, тогда как рубками затронута 61 % территории (табл. 2). Несколько меньшие площади рубок в табл. 1 (48,5 %) объясняются тем, что часть этих контуров в последующем была пройдена пожарами, суммарная площадь которых составляет 20 % территории.

На основе данных Landsat-5...-9 по опубликованным методикам рассчитаны вегетационные индексы: нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI, усовершенствованный вегетационный индекс EVI (англ. Enhanced Vegetation Index) (Huete et al.,

2002), коротковолновый вегетационный индекс SWVI, а также бисезонный индекса леса BSFI (англ. Bi-Seasonal Forest Index) (по Шинкаренко, Барталев, 2023; Шинкаренко и др., 2022). Согласно С. С. Шинкаренко с коллегами (2023) индекс BSFI рассчитывается по нормализованной разности минимизированного за вегетационный сезон NDVI и максимальных значений альbedo в зимний период при наличии снежного покрова по формуле:

$$BSFI = (NDVI_{\min} - Albedo_{\max}) / (NDVI_{\min} + Albedo_{\max}).$$

Таблица 2. Площади рубок по годам

Год	Площадь		Год	Площадь		Год	Площадь		Год	Площадь	
	га	%		га	%		га	%		га	%
1980	399,8	1,18	1993	552,8	1,63	2004	275,3	0,81	2015	578,7	1,70
1982	479,5	1,41	1994	457,8	1,35	2005	457,9	1,35	2016	493,9	1,45
1984	1109,0	3,27	1995	650,8	1,92	2006	384,0	1,13	2017	307,2	0,90
1985	453,6	1,34	1996	456,3	1,34	2007	307,1	0,90	2018	758,7	2,23
1986	25,4	0,07	1997	345,8	1,02	2008	109,9	0,32	2019	429,8	1,27
1987	1424,9	4,20	1998	827,5	2,44	2009	461,4	1,36	2020	371,3	1,09
1988	865,0	2,55	1999	266,6	0,79	2010	232,0	0,68	2021	209,6	0,62
1989	157,8	0,46	2000	940,2	2,77	2011	181,8	0,54	2023	299,1	0,88
1990	1117,3	3,29	2001	814,7	2,40	2012	505,8	1,49	<i>Итого</i>	<i>20719,9</i>	<i>61,02</i>
1991	326,8	0,96	2002	824,6	2,43	2013	406,6	1,20			
1992	677,4	2,00	2003	433,0	1,28	2014	342,9	1,01			

В связи с ограниченным количеством безоблачных данных использованы индекс NDVI за май и значения альbedo за январь, рассчитанные по (Liang, 2001; Silva et al., 2016).

Для анализа применимости индексов по данным ДЗЗ разных лет с помощью инструментов зональной статистики ArcGIS 10.5 сравнивались средние значения для отдельных выделов рубок различного возраста, а также данные индексов, полученные с одного снимка за август 2021 г., май и август 2023 г. для выделов, пройденных рубками в разные годы (рис. 3, см. с. 199).

Результаты и обсуждения

К сожалению, результаты показывают слабую применимость индексов NDVI и EVI для анализа послерубочной динамики темнохвойных лесов. Использование длинного временного ряда данных ограничено малым количеством безоблачных данных за период максимума вегетации (июль – август). Кроме того, для юга Хабаровского края характерна высокая вариабельность климатических условий. В отдельные годы количество осадков может отличаться от нормы в два и более раз, а для второй половины лета – в 10–15 раз, значения средней температуры июня – августа в отдельные годы различаются на 2–2,5° (Петров и др., 2000). Всё это приводит к большому разбросу значений вегетационных индексов, рассчитанных по снимкам разных лет. Кроме того, использование данных Landsat разных поколений требует применения поправочных коэффициентов, рассчитанных поставщиком данных лишь для пары Landsat-7 – Landsat-8.

Минимизировать большой разброс данных можно сравнением величин, полученных с одного снимка для выделов, пройденных рубками в разные годы (Meddens et al., 2013). Но и в этом случае результаты малоинформативные. Если в первые пять лет оба индекса показывают устойчивый рост, то в последующие 35 лет среднее значение индексов не отражает какой-либо динамики (NDVI) или индексы прирастают очень слабо (EVI) (см. рис. 3).

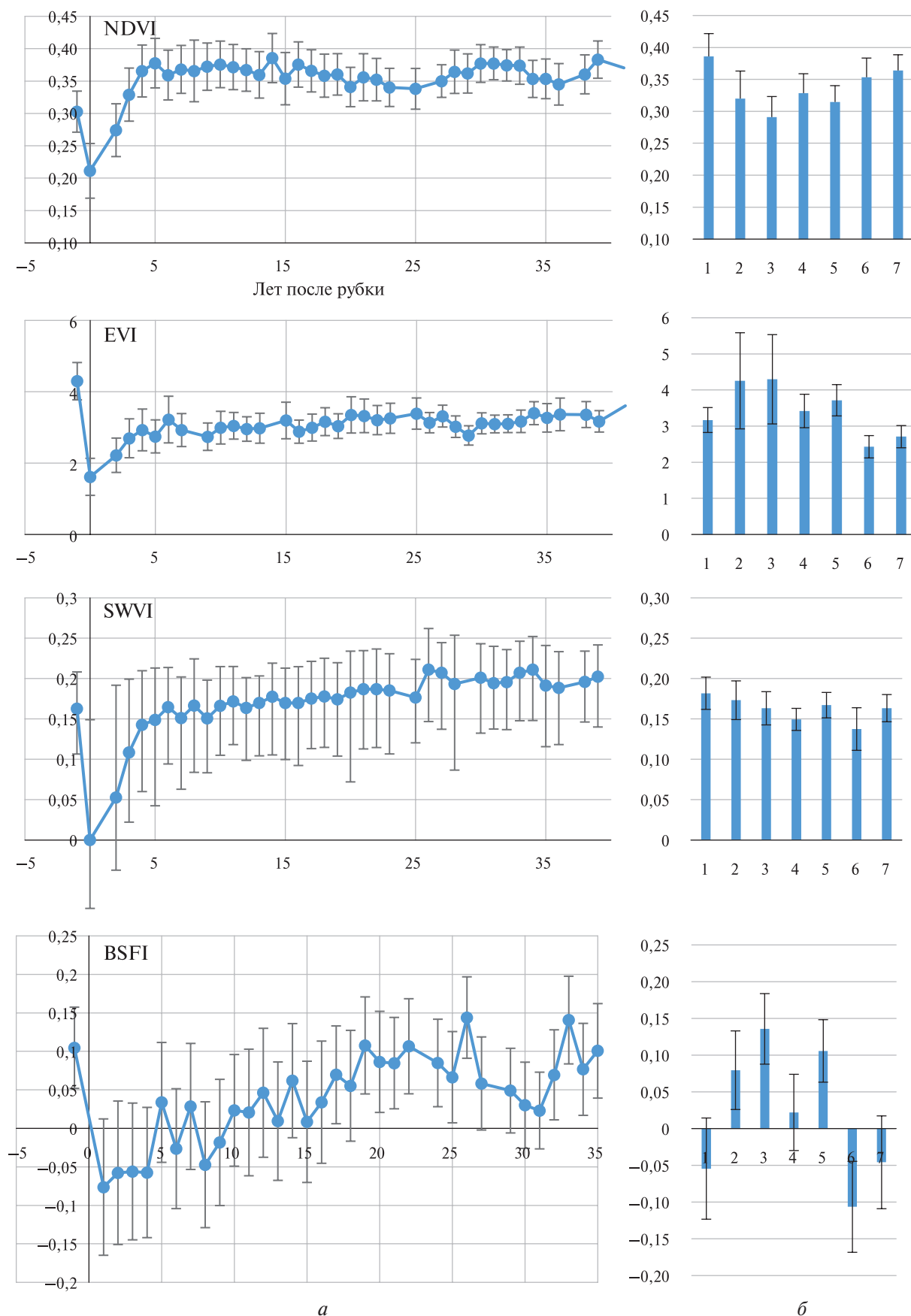


Рис. 3. Среднее значение вегетационных индексов на вырубках разных лет (а) и их величина для естественной растительности (б). Индексы растительности см. в табл. 1

При этом значения NDVI значительно выше дорубочного уровня, тогда как значения EVI его не достигают. Одновременно отмечается значительный разброс значений как для вырубок различных лет, так и для отдельных выделов за определённый год.

По нашему мнению, это связано со следующими факторами:

1. Горный рельеф территории, который определяет значительные экспозиционные различия освещённости.

2. Специфика технологий рубки в елово-пихтовых лесах, когда в пределах выдела формируются полосы волоков, на которых практически не отмечается лесовосстановление (по данным экспедиционных работ и съёмки с БПЛА). При этом на межволочных пространствах при заготовке древесины остаётся значительное количество подроста и тонкомера (до 15 см), которые в дальнейшем (через 10–15 лет) могут формировать сомкнутый древостой (рис. 4). Ширина данных полос — 25–50 м, что близко к значениям пикселя Landsat. В результате в пределах одного контура вырубки значения индекса отражают как характеристики сомкнутой лесной растительности, так и травяно-кустарниковых сообществ, что приводит к их значительным вариациям.



Рис. 4. Полосчатая структура древостоя на вырубках разных лет

3. Особенности распределения биомассы горных темнохвойных лесов Северного Сихотэ-Алиня. Высокая сомкнутость древесного полога елово-пихтовых лесов приводит к формированию зеленомошного наземного покрова и практически полному отсутствию кустарникового и травяного яруса, что наряду с интенсивным поглощением древесного яруса в красном

канале приводит к низким значениям вегетационных индексов. В результате величины NDVI и EVI сомкнутых лесов в период максимума вегетации совпадают со значениями показателей послерубочных, постпирогенных сообществ и ниже средних индексов пойменных ивово-луговых закустаренных сообществ, смешанных лесов и травяно-мохово-кустарничковых болот.

Для минимизации указанных выше факторов дополнительно рассчитан коротковолновой вегетационный индекс SWVI (за август 2021 и 2022 гг.) и бисезонный индекс леса BSFI, полученный по данным Landsat-8 за 2023 г. (май, февраль) (см. *рис. 3*).

Индексы BSFI и SWVI в пределах района работ демонстрируют схожую динамику хода показателей. Для послерубочных выделов наблюдается резкое падение значений в первые два – четыре года после рубки и умеренный рост в последующие 20 лет, что связано с увеличением доли хвойных пород в древостое. Через 25 лет после рубки величины индексов стабилизируются. Но в отличие от SWVI бисезонный индекс позволяет уверенно разделять лесные и нелесные земли, а также, хотя и в меньшей степени, древостои с разной долей участия светло- и темнохвойных пород.

Тем не менее сохраняются недостатки, обусловленные формированием «чересполосного» древостоя на волокнах, приводящие к большому разбросу показателя в пределах одного контура.

Заключение

Таким образом, наиболее распространённые сегодня вегетационные индексы NDVI и EVI мало пригодны для анализа восстановления темнохвойных лесов Северного Сихотэ-Алиня. Индексы BSFI и SWVI лучше отражают восстановление темнохвойных лесов после рубки, но также имеют ряд недостатков, затрудняющих интерпретацию данных.

По нашему мнению, преодоление этого возможно лишь при изменении пространственного разрешения данных ДЗЗ. При увеличении размера пикселя значения индекса будут отражать мозаику растительного покрова в целом, но это затруднит анализ выделов малого размера (например, некоторые выделы имеют размер 200×450 м, т. е. соответствуют 2 пикселям MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer — сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения)). В ином варианте при увеличении пространственного разрешения данных до 2–5 м/пиксель возможен анализ поверхности волокон и межволоконного пространства по отдельности. Альтернативой этому может стать применение БПЛА с мультиспектральной камерой, позволяющей использовать подспутниковые наблюдения состояния растительности со спутниковыми данными об альбедо поверхности.

Литература

1. *Барталев С. А., Курятникова Т. С., Стибиг Х.-Ю.* Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005. Т. 2. № 2. С. 217–227.
2. *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.
3. *Белова Е. И., Ершов Д. В.* Исследование возможности оценки возобновления лесной растительности после сплошных рубок по спутниковым данным Landsat (на примере Брянского Полесья) // *Вопросы лесной науки*. 2019. Т. 2. № 4. С. 1–20. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-20.
4. *Верхотуров А. А., Мелкий В. А., Сабиров Р. Н.* Геоинформационное картографирование пихтово-еловых лесов по данным космических съемок в различных спектральных диапазонах // *Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технолог. решения*. 2020. Т. 1. С. 141–147. DOI: 10.33764/2687-041X-2020-1-141-147.
5. *Воробьев О. Н., Курбанов Э. А.* Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на горах Марийского лесного Заволжья // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 2. С. 84–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97.

6. *Жирин В. М., Князева С. В., Эйшлина С. П.* Дистанционное сопровождение лесообразовательного процесса в послерубочных таежных лесах Русской равнины // *Лесоведение*. 2011. № 6. С. 29–38.
7. *Климина Е. М., Остроухов А. В.* Ландшафтно-экологическое зонирование муниципальных районов (на примере Хабаровского края) // *Региональные проблемы*. 2022. Т. 25. № 3. С. 28–30. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-28-30.
8. *Краснощечков К. В., Дергунов А. В., Пономарев Е. И.* Оценка тепловых карт подстилающей поверхности на участках вырубок по данным Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 2. С. 87–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97.
9. *Куулар Х. Б. О.* Исследования растительного покрова республики Тыва по данным спутниковых наблюдений // *Природные ресурсы, среда и общество*. 2020. № 1(5). С. 55–61.
10. *Малинников В. А., Барталев С. С.* Возможности региональной экологической оценки лесов по данным спутниковых наблюдений // *Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2006. № 6. С. 3–18.
11. *Мелкий В. А., Верхотуров А. А., Братков В. В.* Влияние климата на состояние северной части елово-пихтовой подзоны темнохвойных бореальных лесов острова Сахалин // *Региональные геосистемы*. 2020. Т. 44. № 4. С. 415–431. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-415-431.
12. *Петров Е. С., Новороцкий П. В., Ленишин В. Т.* Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области / отв. ред. А. Н. Махинов. Владивосток; Хабаровск: Ин-т водных и эколог. проблем ДВО РАН, 2000. 174 с.
13. *Стыценок 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. *Туктамышев И. Р., Широких П. С., Муллагулов Р. Ю.* Об информативности спектральных каналов и NDVI спутника ДЗЗ Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ для оценки стадий зарастания леса заброшенных сельскохозяйственных территорий // *Экобиотех*. 2021. Т. 4. № 3. С. 178–185. DOI: 10.31163/2618-964X-2021-4-3-178-185.
15. *Швецов Е. Г., Пономарев Е. И.* Мониторинг сплошных вырубок с использованием спутникового продукта глобального изменения лесного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 140–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-140-148.
16. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А.* Возможности оценки сомкнутости защитных лесных насаждений на основе бисезонного индекса леса и материалов съёмки БПЛА // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 1. С. 189–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
17. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Васильченко А. А.* Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 4. С. 207–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
18. *Шум Н. М.* Многофакторная оценка экспортного потенциала лесного комплекса (на примере Хабаровского края) // *Фундам. исслед.* 2021. № 9. С. 85–93. DOI: 10.17513/fr.43098.
19. *Frost G. V., Epstein H. E., Walker D. A.* Regional and landscape-scale variability of Landsat-observed vegetation dynamics in northwest Siberian tundra // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. No. 2. Article 025004. DOI: 10.1088/1748-9326/9/2/025004.
20. *Huete A., Didan K., Miura T. et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. Iss. 1–2. P. 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
21. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms // *Remote Sensing of Environment*. 2001. V. 76. Iss. 2. P. 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4).
22. *Meddens A. J. H., Hicke J. A., Vierling L. A., Hudak A. T.* Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 132. P. 49–58. DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.002.
23. *Miles V. V., Esau I.* Spatial heterogeneity of greening and browning between and within bioclimatic zones in northern West Siberia // *Environmental Research Letters*. 2016. V. 11. No. 11. Article 115002. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/115002.
24. *Silva B. B., Braga A. C., Braga C. C. et al.* Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2016. V. 20. Issue 1. P. 3–8. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8.
25. *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. P. 834–843. DOI: 10.1134/S1995425516070118.

Informativeness of vegetation indices in assessing post-cutting restoration of dark coniferous forests in Northern Sikhote-Alin according to data from Landsat series satellites

A. V. Ostroukhov¹, D. R. Klevtsov²

¹ *Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*
E-mail: Ostran2004@bk.ru

² *Pacific State University, Khabarovsk 680035, Russia*
E-mail: Klevtsov030@gmail.com

The possibility of using vegetation indices to assess the dynamics of indigenous vegetation regeneration was analyzed using the example of a large massif of dark coniferous (spruce-fir) forests in the Vaninsky and Sovetsko–Gavansky districts of the Khabarovsk Territory with a total area of 34 ths ha and a 43-year history of forestry development. A map of the current state of vegetation and the history of forestry growth in the study region was developed by processing of a long-term series (1980–2023) of Landsat-3...-9 satellite data, expedition materials, and aerial photography data from unmanned aerial vehicle (UAV). The calculated vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), SWVI (Shortwave Vegetation Index), and BSFI (Bi-Seasonal Forest Index) are evaluated for their applicability in assessing post-harvesting dynamics in dark coniferous forests. The results show that the NDVI and EVI indices are unsuitable for these purposes, which is related to both the specificity of the object of investigation and the spatial resolution of the obtained materials. Although the BSFI and SWVI indices better reflect the dynamics of vegetation cover, they have disadvantages associated with large value scatter due to the specifics of the dark coniferous forests regeneration, which hampers data interpretation.

Keywords: vegetation indices, NDVI, EVI, SWVI, BSFI, Landsat-8, reforestation, fir-spruce forests, Northern Sikhote-Alin

Accepted: 04.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-194-204

References

1. Bartalev S. A., Kuryatnikova T. S., Stibig H.-J., Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 217–227 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Belova E. I., Ershov D. V., Using Landsat time series for assessing reforestation on clear cuts in Bryansk region, *Forest science issues*, 2019, Vol. 2, No. 4, pp. 1–20 (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-20.
4. Verhoturov A. A., Melkiy V. A., Sabirov R. N., Geoinformation mapping of fir-spruce forests by data of space survey in various spectral ranges, *Regulirovaniye zemel'no-imushchestvennykh otnoshenii v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya* (Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions), 2020, Vol. 1, pp. 141–147 (in Russian), DOI: 10.33764/2687-041X-2020-1-141-147.
5. Vorobiev 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. 84–97 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97.
6. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eidlina S. P., Remote maintenance of forest-forming process in taiga forests after their cutting in the Russian Plain, *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 29–38 (in Russian).
7. Klimina E. M., Ostroukhov A. V., Landscape and ecological zoning of municipal districts on the Khabrovsk territory example, *Regional problems*, 2022, Vol. 25, No. 3, pp. 28–30 (in Russian), DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-28-30.

8. Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Ponomarev E. I., Evaluation of underlying surface temperature maps on logging sites using Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 87–97 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97.
9. Kuular Kh. B. O., The study of vegetation cover of the republic of Tyva from satellite observation, *Natural resources, environment and society*, 2020, No. 1(5), pp. 55–61 (in Russian).
10. Malinnikov V. A., Bartalev S. S., Possibilities of regional ecological assessment of forests based on satellite observations, *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2006, No. 6, pp. 3–18 (in Russian).
11. Melkiy V. A., Verkhoturov A. A., Bratkov V. V., Climate influence on the state of the northern part of the eel-fir subzone of the dark coniferous boreal forests of Sakhalin Island, *Regional Geosystems*, 2020, Vol. 44, No. 4, pp. 415–431 (in Russian), DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-415-431.
12. Petrov E. S., Novorotskii P. V., Lenshin V. T., *Klimat Khabarovskogo kraia i Evreiskoi avtonomnoi oblasti* (Climate of the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region), A. N. Makhinov (ed.), Vladivostok; Khabarovsk: Institute of Water and Environmental Problems FEB RAS, 2000, 174 p. (in Russian).
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, Vol. 16, No. 5, pp. 217–227 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
14. Tuktamyshev I. R., Shirokikh P. S., Mullagulov R. Y., On the information content of spectral channels and NDVI of the Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ remote sensing satellite for assessing the stages of forest overgrowth of abandoned agricultural lands, *Ecobiotech*, 2021, Vol. 4, No. 3, pp. 178–185 (in Russian), DOI: 10.31163/2618-964X-2021-4-3-178-185.
15. Shvetsov E. G., Ponomarev E. I., Detection of clear-cuts using satellite-derived global forest change product, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 140–148 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-140-148.
16. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Possibilities of assessing forest belts canopy closure using Sentinel-2 based Bi-Seasonal Forest Index and UAV data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 189–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
17. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Vasilchenko A. A., Method for protective forest plantations mapping based on multi-temporal high spatial resolution satellite images and Bi-Season Forest Index, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 207–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
18. Shum N. M., Multifactorial assessment of the export potential of the forest complex (on the example of the Khabarovsk territory), *Fundamental research*, 2021, No. 9, pp. 85–93 (in Russian), DOI: 10.17513/fr.43098.
19. Frost G. V., Epstein H. E., Walker D. A., Regional and landscape-scale variability of Landsat-observed vegetation dynamics in northwest Siberian tundra, *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, No. 2, Article 025004, DOI: 10.1088/1748-9326/9/2/025004.
20. Huete A., Didan K., Miura T. et al., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, Issue 1–2, pp. 195–213, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
21. Liang S., Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 76, Issue 2, pp. 213–238, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4).
22. Meddens A. J. H., Hicke J. A., Vierling L. A., Hudak A. T., Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 132, pp. 49–58, DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.002.
23. Miles V. V., Esau I., Spatial heterogeneity of greening and browning between and within bioclimatic zones in northern West Siberia, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11, No. 11, Article 115002, DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/115002.
24. Silva B. B., Braga A. C., Braga C. C. et al., Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2016, Vol. 20, Issue 1, pp. 3–8, DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8.
25. 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, Vol. 9, No. 7, pp. 834–843, DOI: 10.1134/S1995425516070118.