

УДК 630*41:630*443:630*57

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ MODIS¹

© 2021 г. А. В. Ковалев^а, *, В. И. Воронин^б, **, В. А. Осколков^б, В. Г. Суховольский^с, ***

^аФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50, Красноярск, 660036 Россия

^бСибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Лермонтова, 132, Иркутск, 664033 Россия

^сИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

*E-mail: sunhi.prime@gmail.com

**E-mail: bioin@sifibr.irk.ru

***E-mail: soukhovolsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.02.2017 г.

После доработки 03.12.2019 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Рассмотрена возможность оценки состояния древесных растений по данным дистанционного зондирования. Для оценки использованы интегральные показатели кривой сезонной динамики вегетационного индекса (NDVI), которые в течение 2003–2017 гг. сопоставлялись для контрольных и поврежденных пробных площадей в зоне Хамар-Дабана вблизи побережья о. Байкал (Иркутская область). Показано, что использование предложенных интегральных показателей сезонной динамики NDVI позволяет классифицировать изученные пробные площади по состоянию деревьев.

Ключевые слова: лесные насаждения, повреждение, состояние, мониторинг, дистанционные данные, вегетационный индекс.

DOI: 10.31857/S0024114821010058

ВВЕДЕНИЕ

Контроль и мониторинг состояния древесных насаждений в лесах Сибири крайне затруднителен в связи с их гигантскими площадями. К тому же оценки по визуальным признакам (состоянию кроны, повреждениям стволов) появляются на тех этапах патологических процессов, когда управление состоянием этих насаждений становится практически невозможным. Для оценки состояния насаждений на обширных таежных территориях единственно возможным методом мониторинга является дистанционное зондирование. Однако неясно, какие дистанционные характеристики можно использовать для оценки состояния насаждений и насколько заблаговременно эти показатели могут сигнализировать об изменении состояния древесных растений. В настоящей работе рассмотрены возможности использования вегетационного индекса (Tucker, 1979) для оценки состояния древесных насаждений на территории Иркутской области, пораженных бактериальной водянойкой (Воронин и др., 2013; Воронин, 2018).

Всплеск бактериальных болезней хвойных и лиственных пород произошёл в последние десятилетия. При этом неблагоприятное состояние темнохвойных лесов Прибайкалья отмечается уже по крайней мере в течение последних сорока лет (Воронин, Соков, 2005; Плешанов, Морозова, 2009). Ухудшение состояния деревьев связывали с воздействием поллютантов, массовых грибных эпифитотий и размножением насекомых-дендрофагов (Плешанов, Морозова, 2009). В последние же годы картина еще более усложнилась в связи с обнаружением в районах Прибайкалья больших очагов бактериозов хвойных (Воронин и др., 2013; Воронин, 2018). Бактериальные болезни лесов, получившие широкое распространение в последние десятилетия, с большой долей вероятности вызваны климатическими изменениями (Краснобаев, Воронин, 2011).

Бактериальная водянка хвойных пород, поражающая, в том числе и кедр, представляет собой ранее несвойственное для Сибири заболевание. Впервые гибель лесов предположительно от этой болезни обнаружена в 2012 г. на стыке трех муниципальных районов, в Усольском, Слюдянском и Шелеховском лесничествах Иркутской области, относящихся к Байкальской природной территории. Симптомами бактериальной водянки хвой-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (17-05-41012 РГО_а и 17-29-05074 офи_м).

ных являются ослабление и усыхание деревьев, поперечные и продольные трещины в коре и активное смолотечение из них, наличие на поперечном срезе древесины ствола “мокрого ядра”, а у сильно ослабленных и недавно усохших деревьев — характерного “темного водослоя” (Щербин—Парфененко, 1963). Очень часто первым внешне заметным признаком болезни дерева является изменение окраски хвои: вначале она желтеет, обычно начиная с концов, а затем довольно быстро приобретает оранжево-красную или розовато-красную окраску, засыхает, но сразу обычно не осыпается. Это может произойти в любой части кроны — в вершине, сбоку, снизу, в середине кроны, нередко на отдельных мутовках и даже на отдельной ветви, а в некоторых случаях только на концах ветвей, иногда по всей кроне сразу. Для контроля заболеваемости лесов крайне важно своевременно выделить лесные территории, на которых происходят изменения состояния деревьев. В настоящей работе рассмотрена возможность использования для мониторинга состояния лесных насаждений методов дистанционного зондирования.

Вегетационные индексы широко используются для изучения состояния и комплексных изменений растительного покрова на различных пространственных масштабах.

В настоящей работе для классификации растительных сообществ с помощью дистанционных методов использовался нормализованный разностный вегетационный индекс растительности (NDVI), основанный на разнице отражения красного и ближнего инфракрасного излучения, полученного спутниковыми датчиками (Tucker, 1979).

Вегетационный индекс связан с продуктивностью и биофизическими свойствами экосистемы (Liu et al., 2017; Barr et al., 2009; Rechid et al., 2009; Richardson et al., 2010) и представляет собой спектральный индикатор фотосинтеза и интенсивности метаболизма растительности (Bayarjargal et al., 2006; Cunha, Richter, 2014; Ma et al., 2013). При изучении динамики вегетационных индексов растительного покрова рассматриваются как внутригодовые, так и межгодовые изменения, связанные с изменчивостью климата (Jacquin et al., 2010; Tottrup, Rasmussen, 2004) или с естественными или антропогенными изменениями растительного покрова (de Beurs, Henebry, 2005; Verbesselt et al., 2009).

Показатели NDVI успешно используются для различных оценок состояния и изменений в растительном покрове, поскольку значения NDVI связаны с фотосинтетически активным излучением. Дистанционное зондирование широко используется для картирования пространственной динамики вспышек насекомых (Verbesselt et al., 2012; Liang et al., 2014; Senf et al., 2017). Однако ос-

новной целью таких исследований является оценка ущерба, нанесенного вспышкой, и расчет площади потери. Попытки использовать данные дистанционного зондирования для оценки состояния (и, самое главное, устойчивости) лесных насаждений к внешним воздействиям не приводят к успеху (Spruce et al., 2011; Thayn, 2013; Olsson et al., 2016). Разработка таких методов необходима, так как важно определить районы будущих вспышек насекомых или воздействия болезней, по крайней мере, за один или два сезона до начала повреждения. Такая информация может улучшить прогнозы будущих воздействий и позволит заблаговременно разработать эффективные профилактические меры по снижению потерь в насаждениях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в зоне взаимопроникновения растительных сообществ Хамар-Дабанской гольцово-горно-таежной провинции Южносибирской горно-таежной области и Байкальской озерно-котловинной провинции Байкало-Джугджурской гольцово-горно-таежной области (Белов и др., 2002). Эдификаторами лесов в районе выступают кедр сибирский (*Pinus sibirica*), пихта сибирская (*Abies sibirica*) и ель обыкновенная (*Picea obovata*), при участии сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) (Растительность ..., 1988).

Исследовались деревья в возрасте 100–120 лет на контрольных пробных площадях Выдриной (51°28'16.1" с. ш., 104°51'21.6" в. д.), и Танхой (51°32'35.47" с. ш., 105°7'9.68" в. д.) размером 50 × 50 м, представлявших собой кедрч чернично-зеленомошный с породным составом 10К + П Б, средней высотой около 20 м и средним диаметром кедр в насаждении — 27 см. Кроме того, изучалось состояние деревьев с повреждениями на двух площадях тех же размеров. Насаждение на пробной площади Бабушкин (51°29'53.1" с. ш., 105°59'09.5" в. д.) характеризуется как кедрч чернично-зеленомошный в возрасте от 100 до 120 лет с породным составом 9К1П, средней высотой 18 м и средним диаметром кедр в насаждении 20.5 см. Насаждение на пробной площади Култук (51°46'06.6" с. ш., 103°37'16.6" в. д.) размером 50 × 50 м представляет собой пихтарник лиственнично-кедровый багульниково-зеленомошный с породным составом 9Л1К + Б, средней высотой около 17 м и средним диаметром кедр в насаждении 16.5 см.

Показатель NDVI вычисляется по стандартной формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR и RED — нормализованные значения интенсивности отражения в ближнем инфракрас-

ном и красном диапазоне спектра для данной точки земной поверхности.

Территория вокруг пробных площадей была обследована с помощью квадрокоптера. Установлено, что характеристики насаждений вблизи пробных площадей такие же, как и на пробных площадях, после чего показатели NDVI рассчитывались для пикселей 250 × 250 м с центром на пробной площади.

Показатели были рассчитаны с помощью продукта MYD09Q1 измерительного комплекса MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на международном научно-исследовательском спутнике AQUA (EOS PM-1). Продукт MYD09Q1 включает в себя два спектральных значения для пикселя размером 250 × 250 метров. Для каждого пикселя формируется композит за 8-дневный период по критерию максимального качества с учетом атмосферных условий. Данные получены с ресурса The Earth Observing System Data and Information System EOSDIS (earthdata.nasa.gov). Значения NDVI представлены за период с 2003 по 2017 г. Типичный сезонный временной ряд NDVI приведен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, кривая сезонной динамики NDVI(*n*) имеет сложную форму, и для упрощения ее описания предложена следующая процедура “свертки” сезонного временного ряда значений NDVI(*i*) в год *i* (Ковалев и др., 2019):

1. Определялись максимальное NDVI(*i*)_{max} и минимальное NDVI(*i*)_{min} значения NDVI для сезона *i*.

2. Временной ряд NDVI(*n*), в интервале значений от *n*(*i*)₀ до *n*(*i*)_f подвергался фильтрации высокочастотным скользящим фильтром по пяти точкам:

$$NDVIF(n) = NDVI(n - 2) + NDVI(n - 1) + NDVI(n) + NDVI(n + 1) + NDVI(n + 2).$$

3. Определялось критическое значение NDVIF(*i*)_{крит} за сезон: NDVIF(*i*)_{крит} = NDVIF_{min} + 0.20 (NDVIF(*i*)_{max} - NDVIF(*i*)_{min}).

4. Определялись значение *n*(*i*)₀ – начальная временная точка, до которой все значения NDVIF текущего года ниже значения NDVIF(*i*)_{крит}, и значение *n*(*i*)_f – конечная временная точка, после которой все значения NDVIF текущего года ниже значения NDVIF(*i*)_{крит}.

5. Полученный фильтрованный ряд {NDVIF(*n*, *i*)} аппроксимировался уравнением параболы NDVIF(*n*, *i*) = *a*(*i*)*n*² + *b*(*i*)*n* + *c*(*i*) с помощью нелинейного метода наименьших квадратов, в результате сезонная динамика NDVIF(*n*) в диапазоне значений (*n*₀, *n*_f) характеризовалась тремя параметрами *a*(*i*), *b*(*i*), *c*(*i*);

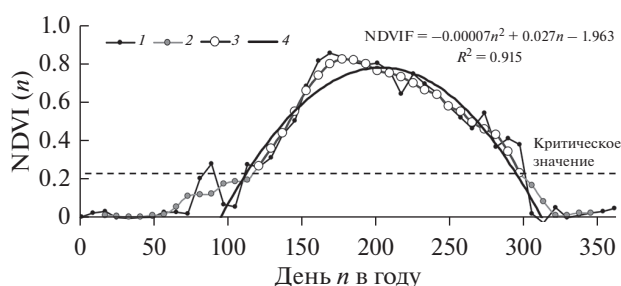


Рис. 1. Типичный временной ряд NDVI(*n*) на пробной площади Выдринной в 2003 г. (*n* – номер дня в течение года): 1 – сезонный ряд NDVI, 2 – фильтрованный ряд 1, 3 – ряд 2, обрезанный по критическому значению NDVIF_{крит} = NDVIF_{min} + 0.2(NDVIF_{max} - NDVIF_{min}), 4 – параболическая аппроксимация ряда 3; 5 – критическое значение NDVI(*n*).

6. Вместо параметров *a*(*i*), *b*(*i*), *c*(*i*) использовались две новых переменных, определяемых по уравнению NDVIF(*n*, *i*) сезонной динамики NDVIF:

– максимальное сезонное значение NDVIF(*i*)_{max}, находившееся стандартным способом из уравнения $\frac{dNDVIF(n, i)}{dn} = 2a(i)n + b(i) = 0$; $n_{max} = \frac{-b(i)}{2a(i)}$;

$$NDVIF(i)_{max} = a(i)n_{max}^2 + b(i)n_{max} + c(i);$$

– скорость $\frac{dNDVIF(i)}{dn} = 2a(i)n_{1/2} + b(i)$ нарастания NDVIF в точке $n(i)_{1/2} = \frac{(n(i)_{max} - n(i)_0)}{2} + n(i)_0$,

расположенной в середине интервала между точками *n*(*i*)₀ и *n*(*i*)_{max}. Эта характеристика примерно соответствует дате начала распускания листьев (Суховольский и др., 2017).

Таким образом, для классификации растительных сообществ предложено использовать два “интегральных” показателя фенологической динамики растительных сообществ NDVIF(*i*)_{max} и *d*NDVIF/*dn*. Использование этих фенологических маркеров вегетационной динамики растительных сообществ позволяет уменьшить число переменных, используемых для анализа и классификации.

Для сопоставления данных дистанционного зондирования с наземными данными на исследованных пробных площадях проводился пересчет деревьев с использованием визуальной шкалы категорий состояния деревьев (табл. 1)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ.

В таблице 2 приведены результаты наземных учетов состояния деревьев на исследованных пробных площадях, проведенных в августе 2018 г.

Как видно из табл. 2, все деревья на пробных площадях Выдринная и Танхой относятся в кате-

Таблица 1. Визуальная шкала категорий состояния деревьев

Характеристики деревьев	Категории состояния					
	1 – без признаков ослабления	2 – ослабленное	3 – сильно ослабленное	4 – усыхающее	5 – сухой текущий года (свежий)	6 – сухой прошлых лет (старый)
Дефолиация (опадение листьев/хвои)	0–5%	10–25%	25–60%	60–100%	100%	100%
Состояние кроны	Крона густая, симметричная, прирост нормальный	Крона слабо ажурная, прирост немного уменьшен	Крона ажурная, прирост заметно уменьшен	Крона изрезана, часто ненормального цвета.	Хвоя/листья усохли, ветви засыхают	Хвоя/листья и мелкие ветви опали
Состояние ствола	Нормальное	Нормальное	Повреждения коры ветвей и стволов стволовыми вредителями	Заметные повреждения ствола вредителями, наличие трутовых грибов	Кора начинает отслаиваться, грибные мицелии под корой	Кора отслаивается на большой площади, вылетные отверстия насекомых

Таблица 2. Распределение деревьев по категориям состояния на обследованных пробных площадях

Пробная площадь	Категория состояния*				
	1	2	3	4	5
Бабушкин	0	0	0.276	0.414	0.310
Култук	0	0.176	0.353	0.235	0.235
Выдринная	1	0	0	0	0
Танхой	1	0	0	0	0

* Подробнее категории см. в табл. 1.

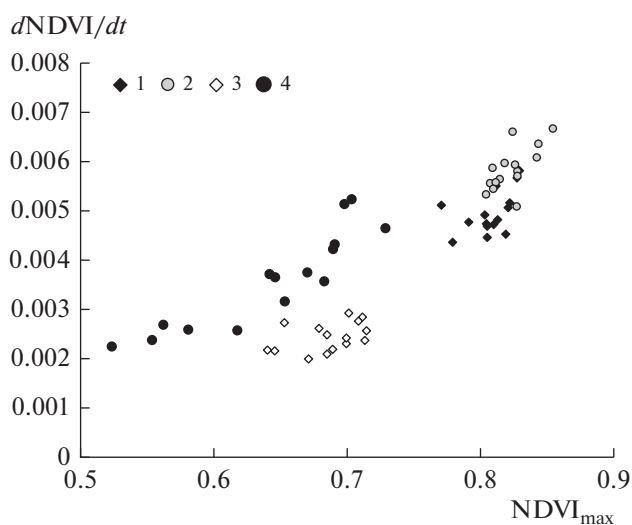


Рис. 2. Значения дистанционных показателей $NDVI_{max}$ и $d(NDVI)/dt$ на пробных площадях в 2003–2017 г. (1 – Выдринная, 2 – Танхой, 3 – Бабушкин, 4 – Култук).

гории 1, и на них отсутствуют видимые признаки повреждений. На пробной площади Култук примерно 20% деревьев принадлежит к категории 2, остальные деревья – к категориям 3, 4 и 5. Большинство (>70%) деревьев на пробных площадях Бабушкин и Култук можно отнести к погибшим (категории 4 и 5).

На рисунке 2 приведены сезонные показатели дистанционного зондирования для изученных пробных площадей в течение 2003–2017 гг. Как видно из рис. 2, дистанционные характеристики в течение 2003–2017 гг. на пробных площадях с поврежденными и неповрежденными деревьями существенно различаются. В таблице 3 приведена классификационная матрица дискриминантного анализа для неповрежденных (пробные площади 1 (Выдринная) и 2 (Танхой)) и поврежденных (площади 3 (Бабушкин) и 4 (Култук)) насаждений.

Из классификационной матрицы для 2003–2017 гг. следует, что все пробные площади практически безошибочно классифицируются по данным дистанционного зондирования (с некоторыми ошибками классифицируются неповрежденные пробные площади 1 и 2) (табл. 4). Качество дискриминации оценивалось по значению λ -критерия Вилкса. Значение $\lambda = 0.036$ в табл. 4 указывает на хорошую дискриминацию данных. Таким образом, возникает возможность оценки состояния насаждений по дистанционным показателям.

Как можно будет использовать полученные результаты для мониторинга состояния насаждений только по показателям NDVI? Для оценки состояния насаждений, для которых не проводились наземные, а лишь аэровизуальные обследования, был выбран трансекта, начинающаяся вблизи пробной площади 3 (Бабушкин) (точка M01) направлением к побережью Байкала. Вдоль вы-

Таблица 3. Классификационная матрица для классификации четырех пробных площадей в течение 15 лет (2003–2017 гг.) по дистанционным данным

Пробные площади по наземным оценкам	Процент точно классифицированных данных	Пробные площади по дистанционным оценкам				Всего лет
		1	2	3	4	
1	73.3	11	4	0	0	15
2	93.3	1	14	0	0	15
3	100.0	0	0	15	0	15
4	100.0	0	0	0	15	15
Всего	91.7	12	18	15	15	60

Таблица 4. Статистическая достоверность (по критерию λ -Вилкса) классификации пробных площадей в течение 2003–2009 гг. по дистанционным данным

переменные	Значение λ -Вилкса	F-критерий	Уровень значимости F-критерия
Всего	0.036	77.65	0
NDVI _{max}	0.167	65.405	0.000
dNDVI/dt	0.163	63.643	0.000

бранной трансекты через каждые 1000 м рассчитывались показатели NDVI за период 2003–2017 гг.

Для точек M01–M18 на трансекте для периода с 2003 по 2017 гг. были вычислены средние многолетние значения сезонных параметров NDVI_{max} и d(NDVI)/dt. На рисунке 3 приведены эти значения, а также средние многолетние показатели NDVI_{max} и d(NDVI)/dt для пробных площадей 3 (Бабушкин) и 1 (Выдринная).

Как видно из рис. 3, все точки на трансекте можно разделить на две группы: точки M01–M07, близкие по своим средним многолетним показателям к средним многолетним показателям поврежденного насаждения на пробной площади 3 (Бабушкин), и точки M08–M18 со средними много-

летними показателями, близкими к средним многолетним показателям для неповрежденного насаждения на пробной площади 1 (Выдринная).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ возможностей использования показателей сезонной динамики вегетационного индекса для оценки состояния лесных насаждений показал, что дистанционные характеристики насаждений, классифицируемых в 2018 г. по наземным оценкам, значимо различаются в предыдущие 15 лет, с 2003 по 2017 гг. (более ранние дистанционные данные отсутствуют). Так как индикаторные параметры NDVI_{max} и d(NDVI)/dt оцениваются с использованием кривой сезонной динамики NDVI, оценить состояние насаждения по дистанционным данным возможно только в конце сезона. При этом данные по сезонной динамике NDVI для всей территории лесов Сибири находятся в открытом доступе, что открывает возможности дистанционного мониторинга обширных лесных территорий. Для дальнейшего анализа возможностей использования дистанционных показателей для построения шкал состояния насаждений предполагается продолжить сопряженный анализ наземных и дистанционных показателей состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В., Лямкин В.Ф., Соколова Л.П. Картографическое изучение биоты. Иркутск: Облмашинформ, 2002. 160 с.
 Воронин В.И. Бактериальная водянка хвойных в байкальских лесах: причины возникновения и риск эпифитотии // Механизмы устойчивости растений и мик-

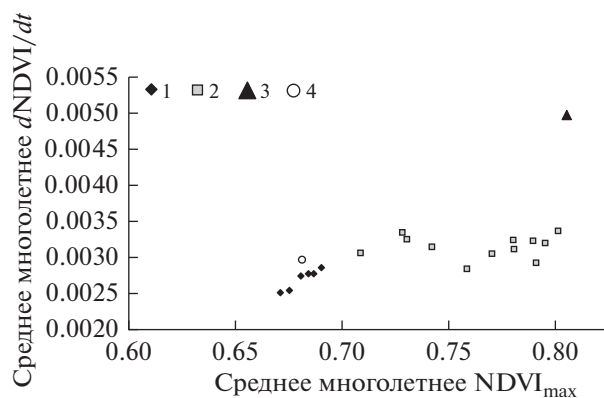


Рис. 3. Средние многолетние значения сезонных показателей NDVI_{max} и dNDVI/dt для точек M01–M07 (кластер 1) и M08–M18 (кластер 2) на трансекте, а также для пробной площади 1 (Выдринная, точка 3) и пробной площади 4 (Бабушкин, точка 4).

- роорганизмов к неблагоприятным условиям среды. Сб. матер. Годичного собрания Общества физиологов растений России, Всеросс. науч. конф. с междунар. участием и школы молодых ученых. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2018. С. 9–12.
- Воронин В.И., Соков М.К.* Влияние сероорганических компонентов атмосферных выбросов на пихту сибирскую // *Лесоведение*. 2005. № 2. С. 62–64.
- Воронин В.И., Морозова Т.И., Ставников Д.Ю., Нечесов И.А., Осколков В.А., Буянтубеев В.А., Михайлов Ю.З., Говорин Я.В., Середкин А.Д., Шуварков М.А.* Бактериальное повреждение кедровых лесов Прибайкалья // *Лесн. хоз-во*. 2013. № 3. С. 39–41.
- Ковалев А.В., Воронин В.И., Суховольский В.Г.* Оценка повреждений кедровых насаждений южного берега оз. Байкал на основе многолетних спутниковых наблюдений MODIS/AQUA // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: Доклады VII Всерос. конф. (Москва, 22–24 апреля 2019 г.)*. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 63–64.
- Краснобаев В.А., Воронин В.И.* Аномальные оттепели как одна из причин повреждений кроны молодых хвойных деревьев в южном Прибайкалье // *География и природные ресурсы*. 2011. № 2. С. 75–78.
- Плешанов А.С., Морозова Т.И.* Микробиоты пихты сибирской и атмосферное загрязнение лесов. Новосибирск: Гео, 2009. 115 с.
- Растительность хребта Хамар-Дабан*. Новосибирск: Наука. 1988. 113 с.
- Суховольский В.Г., Иванова Ю.Д., Овчинникова Т.М., Ботвич И.Ю.* Моделирование фенодинамики листопадных древесных пород // *Лесоведение*. 2017. № 4. С. 293–302.
- Щербин-Парфененко А.Л.* Бактериальные заболевания лесных пород. М.: Гослесбумиздат, 1963. 148 с.
- Barr A., Black T.A., McCaughey H.* Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in western Canada // *Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research*. 2009. P. 3–34.
- Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C., Tucker C.J.* A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. V. 105. № 1. P. 9–22.
- Cunha M., Richter C.* A time-frequency analysis on the impact of climate variability with focus on semi-natural montane grassland meadows // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. № 10. P. 6156–6164.
- de Beurs K.M., Henebry G.M.* Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects // *Global Change Biology*. 2005. V. 11. № 5. P. 779–790.
- earthdata.nasa.gov
- Jacquin A., Sheeren D., Lacombe J.P.* Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. V. 12. P. S3–S10.
- Liang L., Chen Y., Hawbaker T., Zhu Z., Gong P.* Mapping mountain pine beetle mortality through growth trend analysis of time-series landsat data // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 5696–5716.
- Liu Yan, Hill M.J., Zhang Xiaoyang, Wang Zhuosen, Richardson A.D., Hufkens K., Filippa G., Baldocchi D.D., Ma Siyan, Verfaillie J., Schaaf C.B.* Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and Pheno Cams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017. V. 237–238. P. 311–325.
- Ma X., Huete A., Yu Q., Coupe N.R., Davies K., Broich M., Ratana P., Beringer J., Hutley L.B., Cleverly J., Boulain N., Eamus D.* Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 139. P. 97–115.
- Olsson P.O., Lindstrom J., Eldundh L.* Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 181. P. 42–53.
- Rechid D., Raddatz T.J., Jacob D.* Parameterization of snow-free land surface albedo as a function of vegetation phenology based on MODIS data and applied in climate modelling // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. V. 95. P. 245–255.
- Richardson A.D., Black A.T., Ciais P., Delbart N., Friedl M.A., Gobron N., Hollinger D.Y., Kutsch W.L., Longdoz B., Luysaert S., Migliavacca M., Montagnani L., Munger W.J., Moors E., Piao S., Rebmann C., Reichstein M., Saigusa N., Tomelleri E., Vargas R., Varlagin A.* Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010. V. 365. P. 3227–3246.
- Senf C., Seidl R., Hostert P.* Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2017. V. 60. P. 49–60.
- Spruce J.P., Sader S., Ryan R.E., Smoot J., Kuper P., Ross K., Prados D., Russell J., Gasser G., McKellip R.* Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. P. 427–437.
- Thayn J.B.* Using a remotely sensed optimized Disturbance Index to detect insect defoliation in the Apostle Islands, Wisconsin, USA // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 136. P. 210–217.
- Tottrup C., Rasmussen M.S.* Mapping long-term changes in savannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2004. V. 103. № 3. P. 545–560.
- Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8. P. 127–150.
- Verbesselt J., Zeileis A., Herold M.* Near real-time disturbance detection using satellite image time series // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 123. P. 98–108.
- Verbesselt J., Robinson A., Stone C., Culvenor D.* Forecasting tree mortality using change metrics derived from MODIS satellite data // *Forest Ecology and Management*. 2009. V. 258. № 7. P. 1166–1173.

A Possibility to Analyse the Forest's Condition Based on the Remote Sensing Data from MODIS

A. V. Kovalev^{1,*}, V. I. Voronin^{2,**}, V. A. Oskolkov², and V. G. Sukhovolskiy^{3,***}

¹Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center, Siberian branch of the RAS, Akademgorodok st., 50, Krasnoyarsk, 660036 Russia

²Siberian institute of plants physiology and biochemistry, Siberian branch of the RAS, Lermontova st. 132, Irkutsk, 664033 Russia

³Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FI SB RAS), Akademgorodok st., 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: sunhi.prime@gmail.com

**E-mail: bioin@sifibr.irk.ru

***E-mail: soukhovolsky@yandex.ru

The possibility of assessment of the trees' state based on remote sensing data was studied. The integral indicators of the vegetation index (NDVI) seasonal dynamics were used, being compared for control (unharmed) and damaged test plots in the Khamar-Daban zone near the coast of Lake Baikal (Irkutsk region) in 2003–2017. It is shown that the use of the proposed integral indicators of the NDVI seasonal dynamics makes it possible to classify the test plots according to the state of the trees.

Keywords: forest stands, damage, condition, monitoring, remote sensing data, vegetation index.

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of RFBR (17-05-41012 PGO_a and 17-29-05074 офн_м).

REFERENCES

- Barr A., Black T.A., McCaughey H., Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in western Canada, *Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research*, 2009, pp. 3–34.
- Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C., Tucker C.J., A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis, *International J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 105, No. 1, pp. 9–22.
- Belov A.V., Lyamkin V.F., Sokolova L.P., *Kartograficheskoe izuchenie bioty* (Mapping study of biota), Irkutsk: Oblmashinform, 2002, 160 p.
- Cunha M., Richter C., A time-frequency analysis on the impact of climate variability with focus on semi-natural montane grassland meadows, *IEEE Transection Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 10, pp. 6156–6164
- De Beurs K.M., Henebry G.M., Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects, *Global Change Biology*, 2005, Vol. 11, No. 5, pp. 779–790. earthdata.nasa.gov
- Jacquin A., Sheeren D., Lacombe J.P., Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, Vol. 12, pp. S3–S10.
- Kovalev A.V., Voronin V.I., Sukhovol'skii V.G., Otsenka povrezhdenii kedrovyykh nasazhdenii yuzhnogo berega oz. Baikal na osnove mnogoletnikh sputnikovykh nablyudeni MODIS/AQUA (Estimation of siberian pine stands damages at the south shore of Baikal lake based on the long-term satellite observations of MODIS/AQUA), *Aerospace methods and GIS—technologies in forestry, forest management and ecology*, Proc. of the VII All-Russian Conf., Moscow, 22–24 April, 2019, Moscow, TsEPL RAN, 2019, pp. 63–64.
- Krasnobaev V.A., Voronin V.I., Anomal'nye ottepli kak odna iz prichin povrezhdenii krony molodykh khvoynykh derev'ev v yuzhnom Pribaikal'e (Abnormal thaws as one of the causes of damage to the crown of young coniferous trees in the southern Baikal region), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2011, No. 2, pp. 75–78.
- Liang L., Chen Y., Hawbaker T., Zhu Z., Gong P., Mapping mountain pine beetle mortality through growth trend analysis of time-series landsat data, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 5696–5716.
- Liu Y., Hill M.J., Zhang X., Wang Z., Richardson A.D., Hufkens K., Filippa G., Baldocchi D.D., Ma S., Verfaillie J., Schaaf C.B., Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and Pheno Cams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, Vol. 237–238, pp. 311–325.
- Ma X., Huete A., Yu Q., Coupe N.R., Davies K., Broich M., Ratana P., Beringer J., Hutley L.B., Cleverly J., Boulain N., Eamus D., Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 139, pp. 97–115.
- Olsson P.O., Lindstrom J., Eldundh L., Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 181, pp. 42–53.
- Pleshanov A.S., Morozova T.I., *Mikromitsety pikhty sibirskoi i atmosfernoie zagryaznenie lesov* (Micromycetes of Siberian fir and atmospheric pollution of forests), Novosibirsk: Geo, 2009, 115 p. *Rastitel'nost' khrebtba Khamar-Daban*, (Vegetation of the Khamar-Daban range), Novosibirsk: Nauka, 1988, 113 p.

- Rechid D., Raddatz T.J., Jacob D., Parameterization of snow-free land surface albedo as a function of vegetation phenology based on MODIS data and applied in climate modelling, *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, Vol. 95, pp. 245–255.
- Richardson A.D., Black A.T., Ciais P., Delbart N., Friedl M.A., Gobron N., Hollinger D.Y., Kutsch W.L., Longdoz B., Luyssaert S., Migliavacca M., Montagnani L., Munger W.J., Moors E., Piao S., Rebmann C., Reichstein M., Saigusa N., Tomelleri E., Vargas R., Varlagin A., Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, Vol. 365, pp. 3227–3246.
- Senf C., Seidl R., Hostert P., Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions, *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 60, pp. 49–60.
- Shcherbin-Parfenenko A.L., *Bakterial'nye zabolevaniya lesnykh porod* (Bacterial diseases of forest species), Moscow: Goslesbumizdat, 1963, 148 p.
- Spruce J.P., Sader S., Ryan R.E., Smoot J., Kuper P., Ross K., Prados D., Russell J., Gasser G., McKellip R. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. P. 427–437.
- Sukhovol'skii V.G., Ivanova Y.D., Ovchinnikova T.M., Botvich I.Y., Modelirovanie fenodinamiki listopadnykh drevesnykh porod (Simulation of phenodynamics of deciduous tree species), *Lesovedenie*, 2017, No. 4, pp. 293–302.
- Thayn J.B., Using a remotely sensed optimized Disturbance Index to detect insect defoliation in the Apostle Islands, Wisconsin, USA *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 136, pp. 210–217.
- Tottrup C., Rasmussen M.S., Mapping long-term changes in savannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, Vol. 103, No. 3, pp. 545–560.
- Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, No. 2, pp. 127–150.
- Verbesselt J., Robinson A., Stone C., Culvenor D., Forecasting tree mortality using change metrics derived from MODIS satellite data, *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 258, No. 7, pp. 1166–1173.
- Verbesselt J., Zeileis A., Herold M., Near real-time disturbance detection using satellite image time series, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 123, No. 98–108.
- Voronin V.I., Bakterial'naya vodyanka khvoynykh v baikal'skikh lesakh: prichiny vozniknoveniya i risk epifitotii (Bacterial infections of the coniferous in the Baikal forests: causes and risks of epiphytetics), *Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental. Annual meeting society of plant physiologists of Russia*, Book of Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation and Schools of Young Scientists, Irkutsk, Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, Vol. 1, pp. 9–12.
- Voronin V.I., Morozova T.I., Stavnikov D.Y., Nechesov I.A., Oskolkov V.A., Buyantuev V.A., Mikhailov Y.Z., Govorin Y.V., Seredkin A.D., Shuvarkov M.A., Bakterial'noe povrezhdenie kedrovyykh lesov Pribaikal'ya (Bacterial damage to the cedar forests of the Baikal region), *Lesn. khoz-vo*, 2013, No. 3, pp. 39–41.
- Voronin V.I., Sokov M.K., Vliyanie seroorganicheskikh komponentov atmosferynykh vybrosov na pikhtu sibirskuyu (The influence of sulfurorganic components of atmospheric emissions on Siberian fir), *Lesovedenie*, 2005, No. 2, pp. 62–64.