

УДК 630*161:58.04:58.084:57.055

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТИВ: ПОЧЕМУ ПОГИБЛИ ДЕРЕВЬЯ В КРАСНОТУРАНСКОМ БОРУ?

В. Г. Суховольский¹, А. В. Ковалев², П. А. Красноперова³, В. В. Солдатов⁴

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
660036, Красноярск, Академгородок, 50

³ Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

⁴ Центр защиты леса Красноярского края
660036, Красноярск, Академгородок, 50а

E-mail: soukhovolsky@yandex.ru, sunhi.prime@gmail.com, for_polli@mail.ru,
vladimir.soldatow24@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.01.2025 г.

Принята к публикации 11.03.2025 г.

Рассмотрены возможные причины повреждения сосновых насаждений в Краснотуранском сосновом бору в 2022 г. Для анализа использованы данные дистанционного зондирования и показатели, характеризующие текущее состояние деревьев. Рассмотрены значения NDVI разных участков леса и по этим показателям оценены момент и интенсивность повреждения деревьев. Изучено пространственное распределение деревьев по уровню повреждений вдоль выделенной трансекты, показано, что он линейно падает с увеличением расстояния до опушки леса. Сделано предположение, что причиной повреждений мог послужить химический ожог деревьев, полученный при воздействии гербицидов при обработке сельскохозяйственных угодий вблизи границы леса в целях уничтожения сорняков. Изучены закономерности изменения текущего состояния деревьев после воздействий перед повреждением и до начала воздействия на кроны. Для оценки текущего и ретроспективного состояний деревьев предложен комплекс показателей, включающий характеристики спектров первых разностей ширины годичных колец в зоне повреждения за 2–20 лет до даты повреждения, диэлектрические показатели тканей столов деревьев, функции отклика дистанционных характеристик насаждений. Установлено, что при одинаковом визуальном состоянии деревьев до и после повреждения, их реакция на воздействие значительно различается, и часть деревьев категории состояния 1 по визуальным признакам следует классифицировать как деревья с определенным уровнем ослабления в результате воздействия. Использование совокупности методов позволило оценить реакцию деревьев на воздействие в зависимости от их начального состояния.

Ключевые слова: лесные насаждения, состояние, оценка, шкалы, воздействие, реакция деревьев.

DOI: 10.15372/SJFS20250204

ВВЕДЕНИЕ

Краснотуранский ленточный сосновый бор – уникальный экологический объект, занимает массивы бугристо-грядовых песков в правобережной части Абакано-Минусинской котловины. Сосновый бор сформировался на переот-

ложенных супесчаных и песчаных отложениях нижнечетвертичного возраста, вскрытых водотоками древних долин Енисея, Тубы и Сыды (Коляго, 1954). К отличительным чертам климата Краснотуранского соснового бора относятся резкая континентальность, недостаточность и неустойчивость атмосферных осадков, сильные

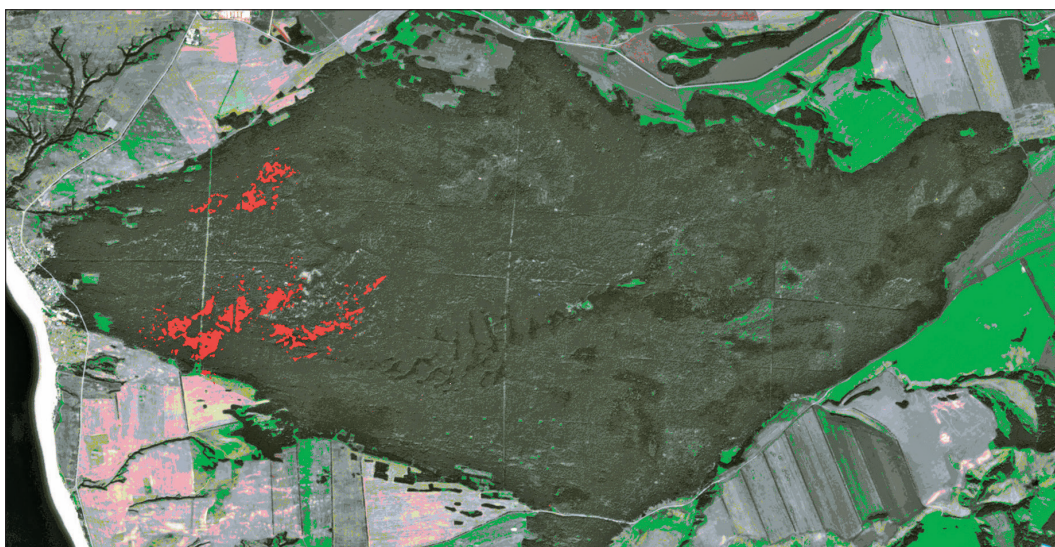


Рис. 1. Вид Краснотуранского бора со спутника Sentinel-2 в июле 2022 г. (красным цветом отмечены участки с повреждением хвои).

ветры, низкая относительная влажность воздуха, часто падающая ниже 30 %. Вегетационный период в ленточном бору составляет примерно 160–165 дней. Абсолютный температурный максимум 41.6 °С. Температура открытой поверхности почвы в летнее время может достигать 60–65 °С. Во время суховея, которые отмечаются довольно часто, относительная влажность воздуха снижается с 50–60 до 10 %. Такие условия способствовали развитию чистых сосновых насаждений на дюнном песчаном рельефе.

Краснотуранский сосновый бор относится к рекреационным объектам, интенсивная хозяйственная деятельность в нем не ведется и уровень рекреационного воздействия на лес достаточно низок. Сильные повреждения леса наблюдались только в 1975–1978 гг., когда он подвергся нападению сосновой пяденицы (*Bupalus piniarius* Linnaeus), что привело к повреждениям и гибели насаждений на территории бора (Пальникова и др., 2002). С этого времени, по данным Центра защиты леса Красноярского края, сильных повреждений на территории Краснотуранского бора не наблюдалось, однако в июле 2022 г. на значительной части бора было зарегистрировано пожелтение и опад хвои крон деревьев (рис. 1).

К сожалению, исследования причин воздействия непосредственно сразу после этого воздействия провести не удалось. Такие оценки проведены по «холодным» следам только в июле 2024 г. В ходе анализа обследован Краснотуранский бор как в зоне повреждений, так и в неповрежденной. Установлено отсутствие по-

жаров на территории бора за последние годы и массовых воздействий филофагов, ксилофагов, а также грибных заболеваний деревьев в зоне повреждений хвои. Настоящая работа посвящена анализу процесса развития патологических явлений и выявлению возможных причин наблюдавшихся повреждений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Краснотуранский ленточный сосновый бор расположен на правом берегу Красноярского водохранилища (географические координаты 54.3° с. ш., 91.6° в. д.), примерно на половине пути между Красноярском и Минусинском. Основная лесообразующая порода – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), которая составляет 90 % всех насаждений. Лиственные породы представлены березой повислой (*Betula pendula* Roth) и осинкой обыкновенной (*Populus tremula* L.), соответственно 8 и 1.3 % от лесопокрытой площади. В сосняках (по данным материалов лесоустройства 1965 г.) преобладали древостои возрастом 80–100 лет. Более 80 % сосняков представлены деревьями II–III классов бонитета, свыше 40 % – высокополнотными (0.8 и выше) древостоями и менее 10 % – низкополнотными (0.3–0.4) (Пальникова и др., 2002). После проведения лесоустройства активной хозяйственной деятельности в бору не проводилось, однако существенных изменений состава растительности в нем не произошло.

Таблица 1. Шкала категорий состояния хвойных деревьев (Правила..., 2017)

№ п/п	Категория	Состояние
1	Здоровые (без признаков ослабления)	Крона густая (для данной породы, возраста и условий местопроизрастания); хвоя (листва) зеленая; прирост текущего года нормального размера
2	Ослабленные	Крона разреженная; хвоя светло-зеленая; прирост уменьшен, но не более чем наполовину; отдельные ветви засохли
3	Сильно ослабленные	Крона ажурная; хвоя светло-зеленая, матовая; прирост слабый, менее половины обычного; усыхание ветвей до 2/3 кроны; плодовые тела трутовых грибов или характерные для них дупла
4	Усыхающие	Крона сильно ажурная; хвоя серая, желтоватая или желто-зеленая; прирост очень слабый или отсутствует; усыхание более 2/3 ветвей
5	Свежий сухостой	Хвоя серая, желтая или красно-бурая; кора частично опала
6	Старый сухостой	Живая хвоя (листва) отсутствует; кора и мелкие веточки осыпались частично или полностью; стволовые вредители вылетели; в стволе мицелий дереворазрушающих грибов, снаружи плодовые тела трутовиков

Для анализа использовался комплекс показателей состояния деревьев, включавший:

1 – оценку текущего состояния деревьев по визуальным признакам;

2 – оценку ширины годичных рядов радиального прироста за последние 20 лет;

3 – расчеты дистанционных показателей NDVI и LST в системе MODIS в 2020–2024 гг.;

4 – расчеты функции отклика NDVI на изменение температуры поверхностного слоя LST;

5 – съемки территории с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА);

6 – оценку текущего состояния деревьев разных категорий состояния, измеренное с помощью методов диэлектрической Фурье-спектроскопии.

Ниже приведены детальные описания методик измерения с помощью всех использованных показателей.

Оценка состояния по визуальным показателям деревьев представлена в табл. 1.

Регуляторные показатели радиального прироста деревьев. В первом приближении процессы высокочастотной регуляции роста годичных колец можно характеризовать двумя показателями – характерным временем обратной связи и амплитудой колебаний показателей первых разностей ширин колец относительно некоторого стационарного значения, равного нулю.

В физических системах для описания реакции системы на внешнее воздействие используется так называемая флуктуационно-диссипативная теорема (ФДТ), согласно которой спектр характеристик системы до воздействия связан с диссипационными изменениями в ней после воздействия (Тимашев, 2007; Коган, 2009).

Соотношения, характеризующие ФДТ, можно представить в упрощенном виде в выражении

$$S(f) = KA''(f), \quad (1)$$

где $S(f)$ – спектральная мощность спектра характеристики системы до воздействия; $A''(f)$ – мнимая часть отклика системы на воздействие на частоте f , характеризующая восприимчивость системы; K – некоторая константа, специфичная для системы.

Если использовать этот подход для описания состояния дерева, можно предполагать существование связи характеристик спектра первых разностей ширин годичных колец (ШГК) дерева в течение некоторого периода времени до начала воздействия на лес с интенсивностью повреждения дерева после начала воздействия (Soukhovolsky et al., 2023).

Для снятия временного тренда был выполнен переход от рядов ширин годичных колец к рядам первых разностей ширин годичных колец. Такая процедура выполнялась для всех деревьев в целях фильтрации возрастного тренда прироста ШГК и при дальнейшем анализе рассматривались ряды первых разностей. Так как среднее значение ряда первых разностей равно нулю, то для оценки вариаций в этих рядах использовалось стандартное отклонение s для каждого ряда. Спектр каждого временного ряда вычислялся с использованием программы, написанной в среде Borland Delphi 7 с использованием стандартных алгоритмов быстрого преобразования Фурье. В качестве характеристики спектра рассматривалась частота $f_{\max}$ максимального значения спектральной плотности.

Диэлектрические характеристики тканей стволов деревьев. Диэлектрические параметры

тканей (сопротивление и емкость в широком диапазоне частот) позволяют характеризовать емкость мембран клеток и проводимость тканей (Schanne et al., 1978; Гусев, 2009; Суховольский и др., 2021).

При патологических процессах в тканях растений характеристики емкостной и омической составляющих импеданса изменяются, в частности, уменьшается емкость клеточных мембран, изменяется проводимость тканей (Грязькин и др., 2012). В связи с этим рассмотрена возможность использования этих показателей для оценки в полевых условиях состояния тканей древесных растений.

Полную характеристику диэлектрических свойств биологической ткани можно получать, проводя измерения действительной и мнимой составляющих импеданса в широком диапазоне частот (в области от 1.0 кгц до 0.5 мгц). Для быстрого измерения полных диэлектрических свойств биологических тканей в широком диапазоне частот и автоматической обработки полученных данных нами использован метод диэлектрической Фурье-спектроскопии (Feldman et al., 2003; Ковалев и др., 2016), который состоит в том, что на измеряемый объект (растительную ткань) подается достаточно «богатый» сигнал воздействия (например, сигнал, состоящий из большого числа синусоид) и регистрируется функция отклика объекта $A(t)$ в плоскости «амплитуда отклика – время», далее, проводя Фурье-преобразование функции $A(t)$, можно получить спектральную функцию $A(f)$. В качестве подходящего сигнала, возбуждающего систему, нами использовалась импульсная функция $X(t)$.

В качестве показателя диэлектрических характеристики прикамбиального комплекса тканей ствола дерева использовались импеданс-годографы. Импеданс-годографы представляют собой кривые, характеризующие связь величин омической и емкостной проводимости на различных частотах. Кривая импеданс-годографа представляет собой полуокружность (диаграмму Дебая), построенную в плоскости вещественной $Re Z$ и мнимой $Im Z$ компоненты импеданса (рис. 2).

Кривую импеданс-годографа можно описать, используя параметры r и x_0 .

Использование методов Фурье-спектроскопии дает, во-первых, значительный выигрыш во времени, требуемом для измерения, так как фактически одновременно проводятся измерения на всех частотах, и во-вторых, позволяет добиться полной автоматизации измерений, так как значе-

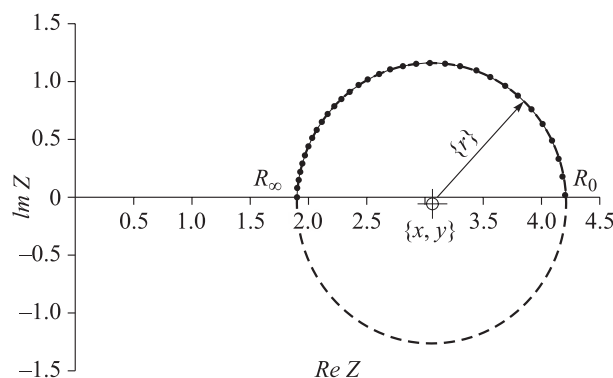


Рис. 2. Кривая импеданс-годографа древесных тканей.

ния функции отклика системы $A(t)$ могут задаваться специальной программой, загруженной в управляющий компьютер, с помощью которого будут проводиться Фурье-преобразования и вычисляться параметры импеданс-годографов.

Для массовых экспрессных оценок состояния отдельных деревьев с автоматической обработкой результатов измерений и сохранением данных на компьютере нами разработан полевой прибор – диэлектрический спектрометр (Суховольский и др., 2021) Процесс измерения (включая подсоединение прибора к объекту – древесной ткани ствола дерева, подачу и обработку сигнала отклика и сохранение данных) длится менее 5 с.

Анализ состояния древостоя строился по реакции фотосинтезирующего аппарата на изменения состояния окружающей среды. Входные и выходные параметры для такой оценки могут быть получены одновременно по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и синхронизированы по времени и месту наблюдения (Kovalev, Soukhovolsky, 2021). В качестве показателя, характеризующего состояние фотосинтезирующего аппарата насаждений, предложено использовать распространенный разностный вегетационный индекс NDVI в течение сезона (Senf et al., 2017). Основным фактором внешней среды выступает параметр радиационной температуры территории (LST) за аналогичный период. Временные ряды данных показателя получены со спутников Terra/Aqua, действующих в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System). Оборудование этих двух спутников в достаточной степени дублируется, что позволяет восстанавливать получаемую информацию, убирая атмосферные помехи для одного из спутников. Исходные данные ДЗЗ со спутников Terra/Aqua доступны для свободного скачивания на сервере NASA. Основным прибором сбора

необходимой информации на спутнике является спектрорадиометр среднего разрешения MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer).

Исходные спектральные каналы sur_refl_b01 (красный) и sur_refl_b02 (ближний инфракрасный) для расчета вегетационного индекса NDVI, содержащиеся в продуктах MOD09Q1 и MYD09Q1, представляющие собой 8-дневный композит (очищенные и селектированные данные за 8 дней), использовались для расчетов NDVI при пространственном разрешении – 250×250 м. Показатель NDVI вычисляется по стандартной формуле

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}, \quad (2)$$

где NIR и Red – нормализованные значения интенсивности отражения в ближнем инфракрасном и красном диапазонах спектра для данной точки земной поверхности (каналы sur_refl_b02 и sur_refl_b01 продуктов MOD09Q1 и MYD09Q1).

В качестве показателя, характеризующего состояние насаждений, в данной работе предложено использовать восприимчивость вегетационного индекса растительность (NDVI) в течение сезона к изменению радиационной температуры территории (LST).

Изменение NDVI можно рассматривать как некоторую функцию от изменений погодных условий и для отдельного года изменения значений LST можно рассматривать как входную в систему, а изменения значений NDVI – как выходную. На связи ΔNDVI и ΔLST можно наложить естественное условие причинности: значение $\Delta\text{NDVI}(t)$ в момент t будет зависеть только от значений $\Delta\text{LST}(t - \tau)$ в прошлые моменты времени $(t - \tau)$. Тогда связи между этими показателями можно конкретизировать и ввести интегральное уравнение

$$\Delta\text{NDVI}(t) = \int_0^t h(\tau) \Delta\text{LST}(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

где $h(\tau)$ – ядро уравнения (3) (функция отклика).

Учитывая возможное запаздывание отклика NDVI на изменение LST, была рассмотрена кросс-корреляционная функция Φ_{yx} , связывающая $\Delta\text{NDVI}(t)$ и $\Delta\text{LST}(t)$ (Wei, 2006):

$$\begin{aligned} \Phi_{yx} &= E[\Delta\text{LST}(t - \tau) \cdot \Delta\text{NDVI}(\tau)] = \\ &= E\left[\int_0^t h(\tau) x(t - \tau) x(t) d\tau\right], \end{aligned} \quad (4)$$

где E – оператор математического ожидания; y – ΔNDVI ; x – ΔLST .

Так как операции математического ожидания E и линейного преобразования F можно переставить, то можно записать

$$\begin{aligned} E\left[\int_0^t h(\tau) x(t - \tau) x(t) d\tau\right] &= \\ = \int_0^t h(\tau) E[x(t) x(t - \tau)] d\tau &= \int_0^t h(\tau) \Phi_{xx} d\tau, \end{aligned} \quad (5)$$

где $h(\tau)$ – функция отклика, Φ_{xx} – автокорреляционная функция ΔLST .

Тогда из (4) и (5) получим:

$$\Phi_{yx} = \int_0^t h(\tau) \Phi_{xx} d\tau. \quad (6)$$

Так как временные ряды ΔNDVI и ΔLST в течение сезона известны, то по их значениям однозначно рассчитываются кросс- и автокорреляционные функции и в уравнении (6) неизвестна только весовая функция (функция отклика) $h(\tau)$, характеризующая восприимчивость ΔNDVI к изменению ΔLST .

Для нахождения функции отклика произведем Фурье-преобразование FT левой и правой частей уравнения (6):

$$\text{FT}(\Phi_{yx}) = \text{FT}\left(\int_0^t h(\tau) \Phi_{xx} d\tau\right) =$$

$$\text{FT}(h(\tau) \cdot \text{FT}(\Phi_{xx})) = H(f) \text{FT}(\Phi_{xx}), \quad (7)$$

где $H(f) = \text{FT}(h(\tau))$.

Из (7) можно найти значение спектра $H(f)$ функции отклика:

$$H(f) = \frac{\text{FT}(\Phi_{yx})}{\text{FT}(\Phi_{xx})}. \quad (8)$$

Полученная спектральная функция $H(f)$ характеризует скорость и интенсивность отклика состояния фотосинтетического аппарата древостоя на воздействие погоды. Типичный вид спектра функции отклика $H(f)$ представлен на рис. 3.

Значение спектральной функции отклика $H(f_0)$ на некоторой частоте f характеризуют интенсивность и скорость $v = 1/f$ отклика NDVI на изменение LST. Составляющие спектра $H(f)$ на низких частотах (вблизи $f = 0$) характеризуют сильно инерционную реакцию ΔNDVI на изменение LST; составляющие спектра $H(f)$ на высоких частотах (вблизи $f = 0.5$) характеризуют быстрый отклик ΔNDVI на изменение LST.

Для автоматизированного расчета спектральной функции отклика в течение сезона использовалась оригинальная программа расчета.

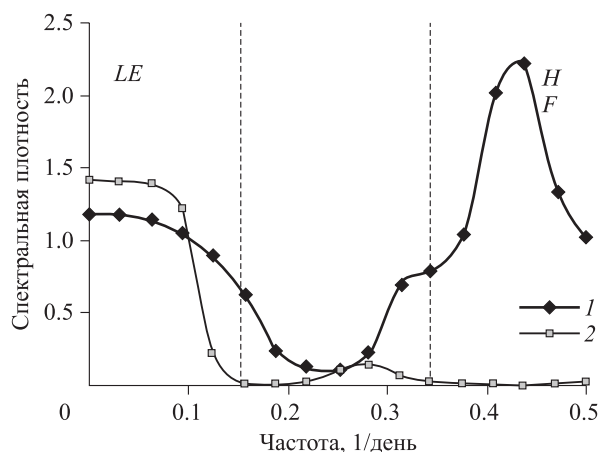


Рис. 3. Типичные виды спектра функции $H(f)$ отклика NDVI на изменение LST для пихтового насаждения в таежных лесах Сибири.

1 – контроль; 2 – год вспышки сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov) в Енисейском районе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возможные причины повреждения насаждений. На первом этапе анализа на территории бора выделена трансекта kr21–kr29 с разным уровнем повреждений крон (рис. 4).

Для каждой точки на трансекте (расстояние между точками 360 м) по данным дистанционного зондирования были получены данные о значениях фотосинтетического индекса NDVI. На рис. 5 для сравнения приведены ряды сезонной динамики NDVI для 2017 и 2022 гг.

По данным дистанционных измерений для каждой точки на трансекте было рассчитано среднее сезонное значение NDVI для периода времени с 2017 по 2023 г.

Так как анализировать и сопоставлять длинные временные ряды NDVI достаточно сложно, то была выполнена свертка данных и далее по данным временных рядов NDVI вычислен индекс патологии $q(t)$ для каждой точки на трансекте в год t :

$$q(t) = \frac{I_{\max} - I(t)}{I_{\max}}, \quad (9)$$

где $I_{\max}$ – максимальное среднесезонное значение NDVI за период наблюдений ($I_{\max} = 0.742$), $I(t)$ – среднесезонное значение NDVI в год t .

Как видно из уравнения (9), если $I(t) \rightarrow I_{\max}$, $q(t) \rightarrow 0$. Если $I(t)$ существенно меньше $I_{\max}$, то значение q будет возрастать. Такая трансформация данных позволяет существенно упростить анализ.

На рис. 6 приведены значения $q(t)$ для точек на трансекте в 2020–2023 гг. Как видно, для 2020 и особенно для 2021 г. значения индекса патологии очень близко к нулю, т. е. можно говорить, что NDVI всех точек на трансекте близко к максимальному значению и пространственной неоднородности по q для трансекта не наблюдается. Для 2022 г. наблюдается резкий подъем q , особенно для точек в начале трансекты вблизи границы леса.

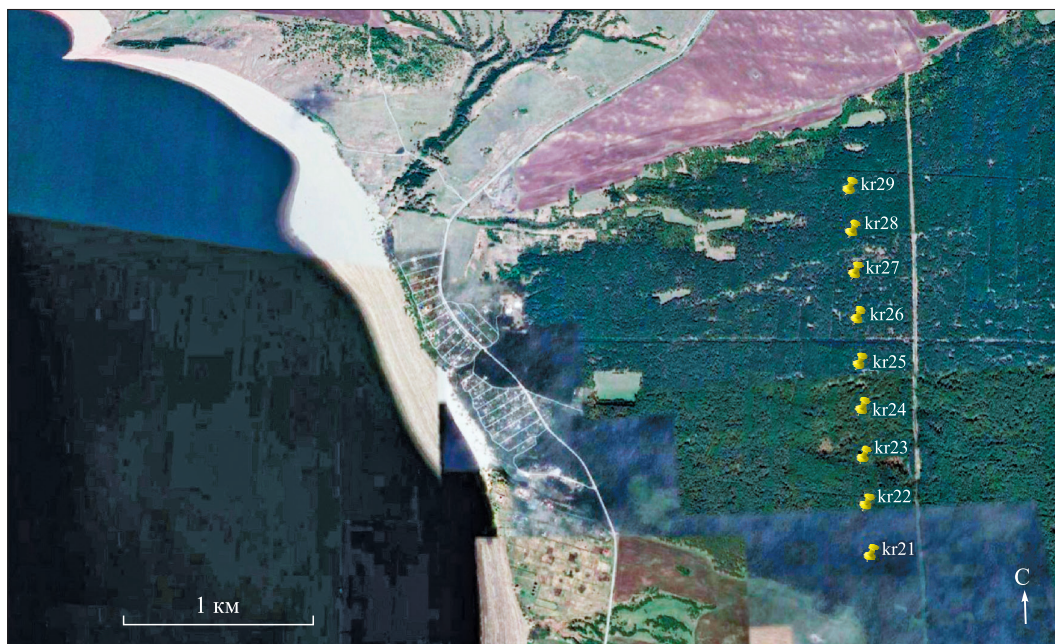


Рис. 4. Расположение трансекты в Краснотуранском сосновом бору.

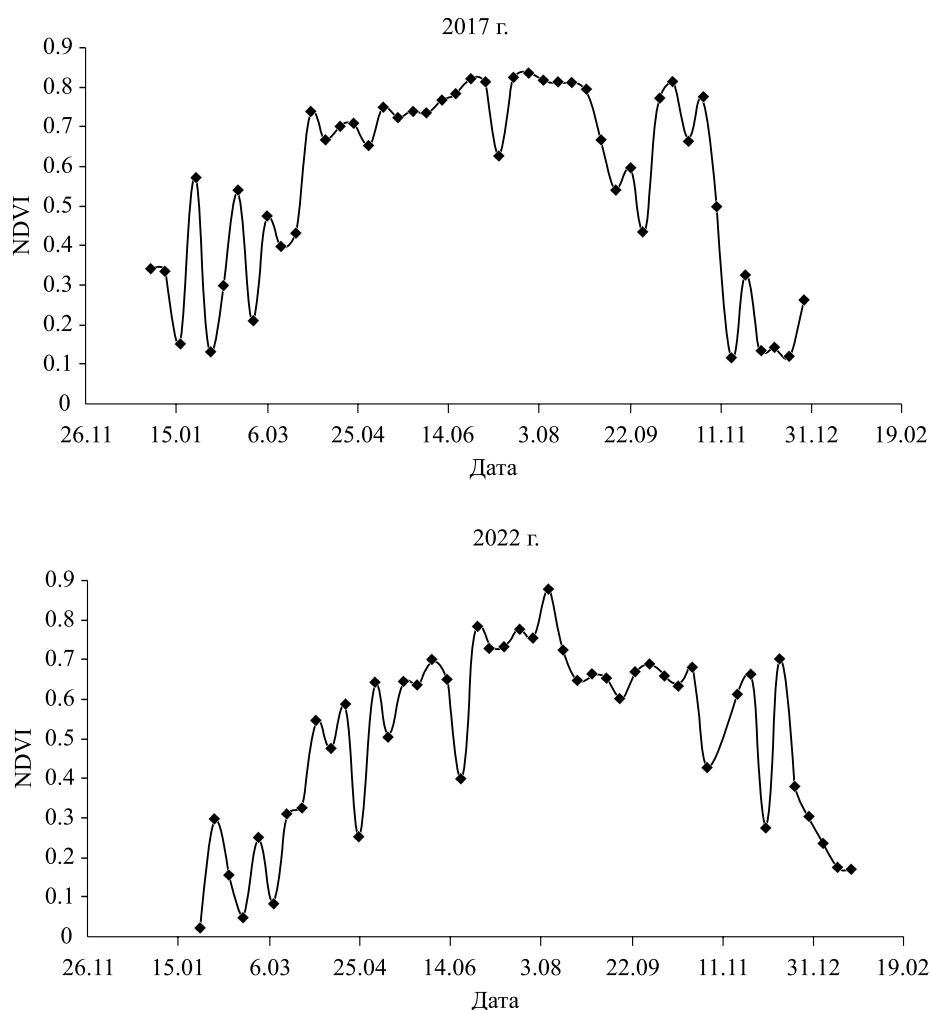


Рис. 5. Сезонная динамика NDVI в 2017 и 2022 гг. в точке kr21 трансекты.

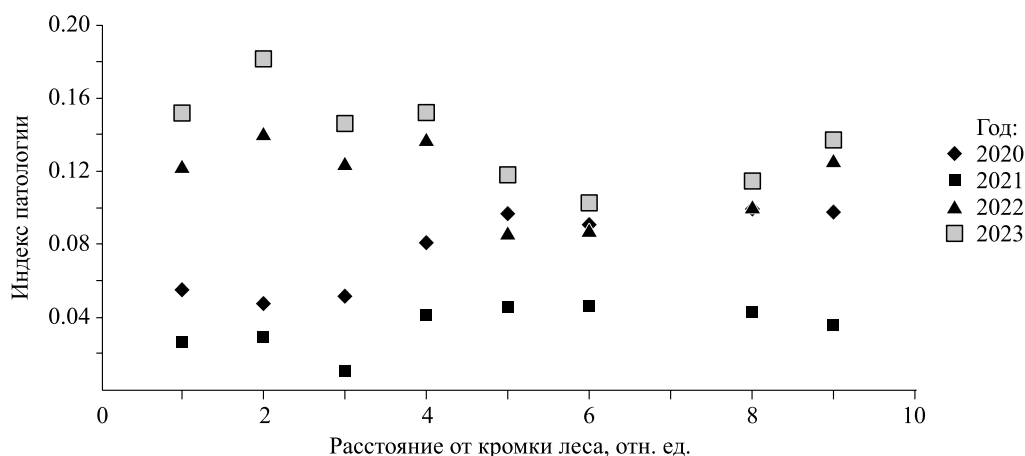


Рис. 6. Значения $q(t)$ для точек на трансекте в 2020–2023 гг.

Значение индекса патологии еще более возрастает в 2023 г. На рис. 7 сопоставляются значения индекса патологии для всех точек на трансекте в 2017 и 2023 гг.

Если сопоставить пространственный тренд q для 2017 и 2023 гг., можно видеть, что в 2017 г. его не наблюдалось. Коэффициент детермина-

ции уравнения $q = A - Bn$ равен $R^2 = 0.005$, и значение параметра $B = 0.0004$, характеризующего изменение q для разных точек на трансекте, значимо не отличалось от нуля, т.е. индекс патологии не изменялся в зависимости от расстояния до границы леса, и для всех точек на трансекте значения индекса патологии не превосходило

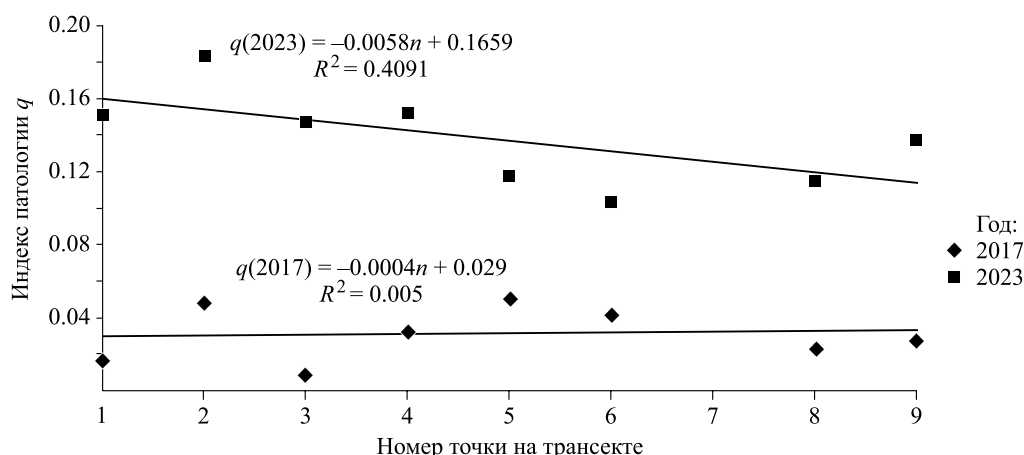


Рис. 7. Индекс патологии для всех точек n на трансекте в 2017 и 2023 гг.

0.05, т. е. значения NDVI были близки к максимальному сезонному. Для 2023 г., напротив, наблюдался значимый тренд индекса патологии вдоль трансекты с отрицательной значимой величиной параметра B , что указывает на то, что повреждения вблизи границы леса (трансекты kr21–kr24) были максимальны.

Обычно такое происходит, если возникает точечный источник воздействия (например, пестициды или ядохимикаты), вредоносный агент диффундирует от источника, постепенно рассеивается, концентрация вредоносного агента падает с увеличением расстояния от источника, доза воздействия с увеличением расстояния до источника уменьшается и эффект воздействия тоже уменьшается.

Таким образом, можно заключить, что в 2022 г. произошло резкое увеличение патологического индекса в насаждении. При этом максимальное значение индекса патологии было характерно для точки kr22 трансекты. Такое обычно происходит при наличии «мертвой» зоны между источником и повреждаемым объектом.

Рост индекса патологии в 2023 г. по сравнению с 2022 г. был вызван тем, что до июля-августа 2022 г. лес не повреждался и значение q для этого года складывалось из малого значения q до начала повреждения и большого значения q после повреждения.

Анализ данных дистанционного зондирования в 2022–2024 гг. показал, что все повреждения насаждений произошли в 2022 г. (рис. 8).

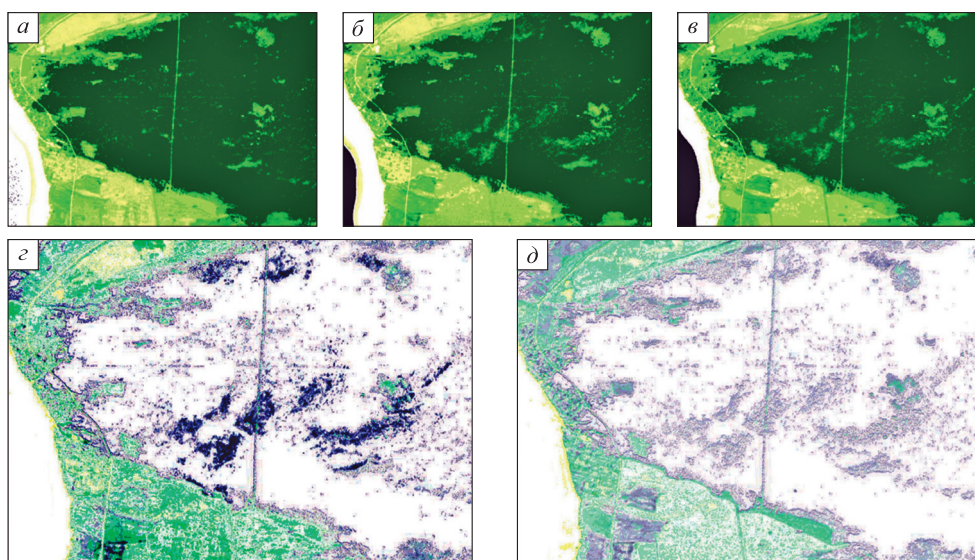


Рис. 8. Западная половина Краснотуранского бора.

$a, б, в$ – весенние снимки 2022 – 2024 гг. со спутника Sentinel-2 (индекс NDVI), показывающие хвойные насаждения; $г$ – разница в проективном покрытии хвойных насаждений между 2022 и 2023 гг.; $д$ – разница в проективном покрытии хвойных насаждений между 2023 и 2024 гг. Темный цвет – различие значений NDVI между данными; на рис. 9, $г$ разность между рис. 9, a и 9, $б$; рис. 9, $д$ – разность между рис. 9, $б$ и 9, $в$.

Таким образом, результаты обследования позволяют заключить, что причиной повреждения хвои деревьев был химический ожог, вызванный воздействием неизвестного вещества, источник которого находился вблизи юго-западной границы бора.

Состояние деревьев в Краснотуранском бору до и после воздействия. Анализ состояния крон деревьев в пикселе kr24 на трансекте в 2024 г. с помощью БПЛА показал, что визуальные состояния деревьев в этом пикселе по виду крон значительно различаются (рис. 9).

Как видно на рис. 9, лишь часть деревьев в пределах изученного пиксела в значительной степени повреждена (серый цвет крон). Повреждение деревьев некоторым агентом на расстоянии L от источника воздействия описывается следующим уравнением:

$$E(t, L) = F(D(t_0, L), Res(t_0 - 1, L)), \quad (10)$$

где $E(t, L)$ – эффект воздействия на дату t , $D(t_0, L)$ – доза воздействия в момент t_0 , $Res(t_0 - 1)$ – начальное состояние и устойчивость дерева, находящегося на расстоянии L от источника воздействия, на дату $(t_0 - 1)$, предшествующую дате воздействия t_0 .

Вид функции $F(D(t_0, L), Res((t_0 - 1), L))$ неизвестен, но в любом случае эффект воздействия должен зависеть как от дозы воздействия, так и от состояния и устойчивости дерева до начала повреждения.

Таким образом, различия уровня повреждений деревьев могут быть вызваны двумя при-

чинами – разницей дозы воздействия на разные деревья или (и) различием состояния деревьев до начала воздействия. Можно предположить, что доза возможного воздействия на деревья в пределах локального участка практически на одном расстоянии от возможного источника воздействия была примерно одной и той же. Тогда различия в уровне повреждения могут быть связаны с различием состояния деревьев до начала воздействия. И для объяснения различий в уровне повреждений деревьев в ходе возможного химического ожога необходимо оценить начальные состояния деревьев до воздействия. Если для оценки состояния деревьев использовать визуальную шкалу, то из данных дистанционного зондирования до начала повреждения можно заключить, что до начала воздействия практически все деревья в Краснотуранском бору можно охарактеризовать как деревья категории 1. Если использовать визуальные характеристики деревьев как параметры в уравнении 10, то для локального участка леса эффект воздействия должен быть одинаковым. Вместе с тем распределение деревьев на локальном участке по текущему визуальном состоянию и по индексу q в 2017 г. не подтверждает это предположение (см. рис. 7). Для оценки текущего (2024 г.) состояния по визуальной шкале на локальном участке леса было выбрано 25 деревьев, из них 8 были классифицированы как деревья 1 и 2 категорий состояния, 7 – как деревья категории 3 и 6 деревьев – как деревья категорий 4 и 5. Однако оценка по визуальным показателям не вполне корректна



Рис. 9. Аэрофотоснимок деревьев в пикселе kr24, сделанный с БПЛА.

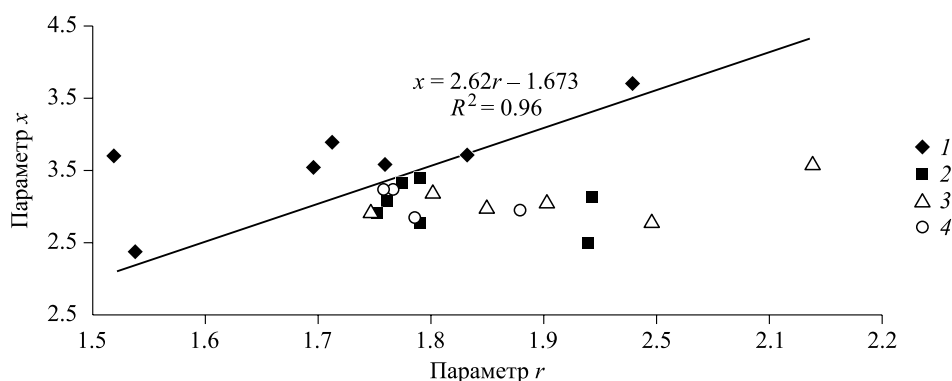


Рис. 10. Значения параметров r и x_0 импеданс-годографов деревьев разных визуальных категорий состояния.

Деревья: 1 – категорий 1 и 2, 2 – категории 3, 3 – категорий 4 и 5, 4 – категории 1 с ухудшенным состоянием.

(не всегда можно полагать, что дерево категории 1 не находится под влиянием воздействий) и для более корректной оценки состояния отдельных деревьев на трансекте был использован метод диэлектрической спектроскопии (Суховольский и др., 2021). Диэлектрические параметры тканей (сопротивление и емкость в широком диапазоне частот) позволяют характеризовать емкость мембран клеток и проводимость тканей. При патологических процессах в тканях растений характеристики емкостной и омической составляющих импеданса изменяются. В частности, уменьшается емкость клеточных мембран, изменяется проводимость тканей. В связи с этим рассмотрена возможность использования этих показателей для оценки в полевых условиях состояния тканей древесных растений.

На рис. 10 приведены значения диэлектрических параметров r и x_0 импеданс-годографов деревьев разных визуальных категорий состояния.

Как видно из рис. 10, деревья из группы 1 категорий 1 и 2 без визуальных признаков патологии достаточно хорошо различаются по своим диэлектрическим характеристикам r и x_0 (см. рис. 2) от деревьев групп 2 и 3 категории 3–5 с патологическими визуальными признаками. Линейная дискриминантная функция $x_0 = 2.62r - 1.673$ делит плоскость $\{r, x_0\}$ на два класса деревьев по диэлектрическим свойствам тканей ствола. Деревья с характеристиками выше дискриминантной прямой можно классифицировать как полностью здоровые, деревья с характеристиками ниже дискриминантной прямой следует классифицировать как деревья с патологическими изменениями состояния. При этом следует отметить, что часть деревьев категории состояния 1, принадлежащих к группе 4, по своим диэлектрическим показателям близки к деревьям категорий 3–5 с патологическими

признаками. Это может указывать на то, что в таких деревьях происходят латентные патологические процессы, не отражающиеся пока на визуальных признаках деревьев. Они могут привести к ухудшению состояния деревьев и снижению их состояния настолько, что появится возможность нападения на эти деревья насекомых-ксилофагов. В связи с этим можно рекомендовать вести постоянное наблюдение за деревьями визуальной категории 1.

Следует отметить, что использование визуальной и диэлектрической шкал состояния дает оценку текущего состояния дерева, но не его состояния до начала повреждения.

Для ретроспективной оценки состояния этих деревьев до начала повреждения можно использовать два показателя: ШГК деревьев и данные дистанционного зондирования территории до начала повреждения.

Для оценки ШГК деревьев разных категорий состояния в 2024 г. были взяты керны и оценены средние значения ШГК в 2011–2015 и в 2016–2020 гг. (рис. 11).

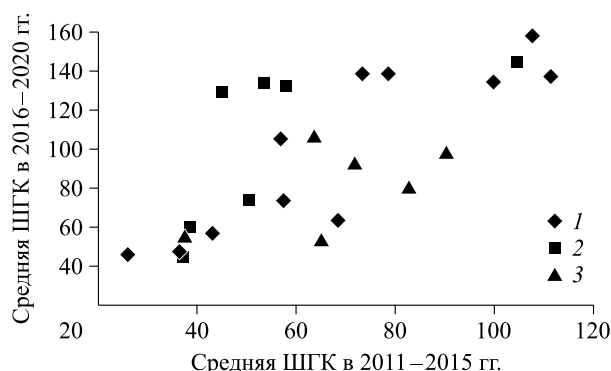


Рис. 11. Средние значения ШГК в 2011–2015 гг. и в 2016–2020 гг.

Деревья в 2024 г.: 1 – категорий 1 и 2, 2 – категории 3, 3 – категорий 4 и 5.

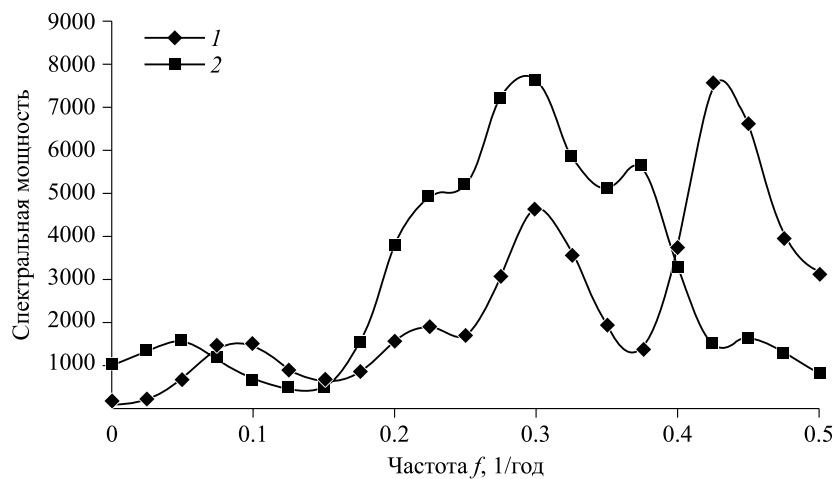


Рис. 12. Спектры рядов первых разностей для дерева № 20 категории 1 (1) и дерева № 5 категории 3 (2).

Как видно из рис. 11, значимых различий в характеристиках ШГК деревьев различных категорий состояния в 2024 г. не наблюдается и возможна ситуация, когда патологический процесс уже идет, но значения ШГК еще близко к норме.

Ранее для оценки регуляторных свойств деревьев различных категории состояния до начала повреждений был предложен подход, заключающийся в оценке стандартного отклонения и частоты моды спектра рядов первых разностей радиального прироста. Для рассмотренных деревьев были вычислены показатели стандартного отклонения S рядов первых разностей радиального прироста и частоты $f_{\max}$ моды спектра ряда первых разностей. На рис. 12 в качестве примера приведены спектры рядов первых разностей для типичных деревьев категории 1 и 3.

Как видно из рис. 12, для дерева № 20 категории 1 частота $f_{\max}$ моды спектра равна 0.425, тогда как для дерева № 5 — 0.30. Для всех рассмотренных деревьев были вычислены показатели частоты $f_{\max}$ моды спектра и стандартного отклонения S ряда первых разностей радиального прироста (по теореме Винера-Хинчина эта величина соответствует мощности спектра первых разностей).

В дальнейшем была предпринята попытка связать категории деревьев в разных шкалах (визуальной, диэлектрической и спектральной). На рис. 13 в плоскости $\{S, f_{\max}\}$ приведены характеристики деревьев, классифицированных по трем категориям состояния.

Как видно из рис. 13, все рассмотренные деревья можно разделить на две группы: А — деревья с поврежденной кроной + деревья с неповрежденной кроной, но с ухудшенным состоя-

нием по диэлектрическим показателям (деревья группы 1 и 2 на рис. 13) и В — деревья с неповрежденной кроной и хорошим состоянием по диэлектрическим показателям (деревья группы 3 на рис. 13).

Каким образом можно трактовать полученные результаты? Исходя из флуктуационно-диссипационной теоремы (уравнение 1), можно предположить, что для деревьев со значениями $f_{\max}$, близкими к максимальным значениям $f_{\max} = 0.5$, характерна быстрая реакция на возможные воздействия, тогда как характерное время реакции дерева на внешнее воздействие растет при уменьшении значения $f_{\max}$. Кроме того, малые значения стандартного отклонения указывают на малую амплитуду ответной реакции на воздействие. Таким образом, показатели

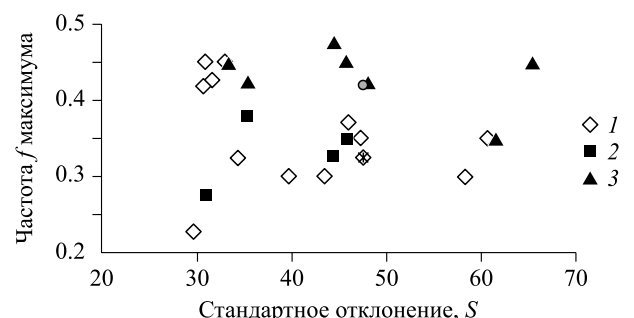


Рис. 13. Регуляторные характеристики деревьев разных категорий состояния.

Деревья: 1 — визуальных категорий состояния 3–5 с диэлектрическими характеристиками ниже значений линейной дискриминантной функции на рис. 9, 2 — визуальной категории состояния 1 с диэлектрическими характеристиками ниже значений линейной дискриминантной функции, 3 — визуальной категории состояния 1 с диэлектрическими характеристиками выше значений линейной дискриминантной функции.

Таблица 2. Матрица дискриминантного анализа по шкалам состояния деревьев в соответствии с рис. 13

Показатель	Точность классификации, %	G_1:1	G_2:2
G_1:1	87.5	14	2
G_2:2	77.8	2	7
Всего ...	84.0	16	9

спектров рядов первых разностей ШПК характеризуют потенциальную устойчивость системы к внешнему воздействию.

По показателям линейного дискриминантного анализа точность разделения деревьев на две группы состояния составляет 84 %, но нелинейная дискриминация может дать почти 100 % разделение этих групп деревьев (табл. 2).

На следующем этапе анализа с использованием характеристик функций отклика дистанционных показателей можно уточнить, происходило ли латентное ухудшение состояния насаждений до 2022 г. Для получения такой оценки были вычислены низко- и высокочастотные компоненты LF и HF функции отклика изменений $NDVI$ в ответ на изменения LST (Kovalev et al., 2024). Эти величины характеризуют ухудшение состояния насаждений до того, как происходит воздействие на лес, что стало видно по изменению $NDVI$. На рис. 14 приведены значения LF и HF для поврежденного участка леса с 2017 по 2023 гг.

Сдвиги LF и HF предшествуют изменению $NDVI$ и происходят на начальном этапе патологии. Если на лес было оказано импульсное воздействие, то изменения функции отклика по фазе будут совпадать с изменением функции $q(t)$. Если патологический процесс развивается медленно, на начальном латентном этапе патологии значения функции отклика будут изменяться, а индекс патологии будет близок к нулю.

Тогда по фазовому сдвигу между компонентами функции отклика и индексом патологии

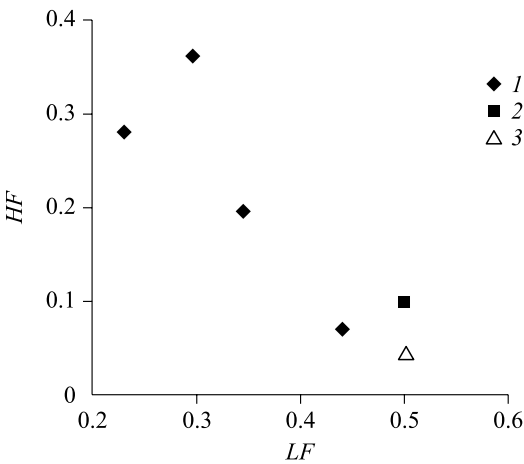


Рис. 14. Значения LF и HF для поврежденного участка леса.
1 – 2017–2020 гг.; 2 – 2021 г.; 3 – 2022–2023 г.

можно будет определить время начала патологического процесса.

Как видно из рис. 14, для 2022 и 2023 гг. характерно резкое ухудшение состояния деревьев на трансекте, что указывает на резкое внешнее воздействие на лес.

Результаты проведенных в Краснотуранском бору исследований можно обобщить и представить общую схему оценки патологических процессов в лесных насаждениях.

Предположим, что в насаждении произошло ухудшение состояния вследствие воздействия некоторого фактора. Модальность фактора (пожар, вспышка массового размножения насекомых, грибные заболевания, химические воздействия и т. п.) неизвестна, но по реакции насаждений на этот фактор, выражающийся в гибели листьев (хвои), можно оценить временные и пространственные характеристики источника воздействия.

Можно классифицировать все возможные воздействия на лес с описанием временных и пространственных характеристик воздействия, независимо от его модальности (табл. 3).

Таблица 3. Пространственно-временные характеристики воздействия на лес

Временные характеристики воздействия	Пространственные характеристики воздействия	
	интегральные	локальные
Быстрые	Воздействие, на которое одновременно реагируют все деревья в насаждении	Локальное воздействие, на которое либо не реагируют все деревья в насаждении, либо интенсивность воздействия уменьшается с расстоянием до локального источника воздействия
Медленные	Воздействия, на которое реагируют все деревья в насаждении, но скорость реакции у разных деревьев будет отличаться	Воздействие, на которое реагируют только деревья на локальной территории, либо зона воздействия расширяется крайне медленно

Временные характеристики. Пусть до некоторого момента времени t_0 фактор не действовал на деревья и их состояние (в простейшем случае будет его характеризовать некоторой величиной Q) находилось в пределах нормы – некоторого значения Q_n .

После начала воздействия внешнего фактора состояние дерева начинает изменяться, но внешние признаки ослабления, оцениваемые в визуальной шкале Q_{in} (например, изменение окраски хвои) появляются не мгновенно, а через некоторое латентное время T_l . Чем сильнее воздействие, тем меньше T_l . Значение T_l можно оценить по интервалу времени между состоянием Q_n и Q_{in} . Состояние в норме для дерева можно оценить по восприимчивости $dNDVI/dLST$ дистанционного показателя NDVI к изменению дистанционного показателя LST. При внешних воздействиях по датам между сдвигом восприимчивости для регистрируемой по дистанционным показателям функцией отклика или функцией гистерезиса и проявлением визуальных признаков изменения окраски хвои можно оценить латентное время T_l . При малом T_l можно утверждать, что фактор действовал на насаждение быстро и сильно, и оценить дату, когда воздействие началось.

Аналогично T_l можно оценить как интервал времени между датой, когда началось изменение спектра ряда первых разностей радиального прироста деревьев, и датой, когда проявились визуальные воздействия, регистрируемые через изменение цвета хвои. Просто деревья лиственных пород в связи с возможной репарацией листовой быстро возвращаются к состоянию нормы.

«Доза-эффект» в системе «дерево – фактор воздействия». Изменение состояния деревьев могло происходить либо после воздействия внешнего фактора на всей обследованной территории, либо после воздействия от какого-либо точечного источника. Во втором случае интенсивность воздействия будет уменьшаться в зависимости от расстояния от источника воздействия. Можно ввести некоторую величину – параметр порядка $q(L)$, характеризующую интенсивность реакции деревьев на воздействие на расстоянии L , и рассматривать реакцию дерева в зависимости от особенностей ландшафта и предполагаемой точки воздействия как фазовый переход второго рода, подобно модели воздействия поллютантов на лесные насаждения (Суховольский, Иванова, 2018; Soukhovolsky, Ivanova, 2018). Аналогичную работу можно сле-

довать для оценки реакции деревьев лиственных пород на внешнее воздействие точечного источника. Для этого по данным сезонной динамики NDVI можно по характеристикам опада выявить территории, занимаемые лиственными насаждениями, а после определить реакцию дерева на внешние воздействия по рефолиации деревьев хвойных пород через латентное время T_l . При этом нужно иметь в виду, что после однократного сильного воздействия у деревьев лиственных пород может произойти рефолиация, и следы воздействия могут исчезнуть.

Промежуточные между Q_n и Q_{in} состояния деревьев. В случае, если латентное время T_l воздействия будет достаточно большим, и реакция деревьев на воздействия будет достаточно медленной, возможно, будут существовать деревья с промежуточными состояниями между состоянием в норме и патологическим, характеризующим измененной окраской хвои. Тогда по медленному визуальному показателю состояния дерева можно оценивать как находящееся в норме, тогда как по быстрому показателю состояния, характеризующему по диэлектрическим характеристикам тканей камбия и по дистанционным показателям восприимчивости оно будет находиться за пределами нормы. Для оценки возможности такого эффекта нами определялись диэлектрические характеристики тканей деревьев, относимых к норме по медленным показателям состояния, а также рассматриваемых как поврежденные по медленной шкале состояния. Если у части деревьев в норме по медленным показателям характеристики состояния будут отличаться от нормы по «быстрым» показателям, это будет означать, что процесс деградации деревьев может идти, но медленно.

Прогноз процессов в насаждении после внешнего воздействия. Если воздействие было точечным и состояние перестало изменяться после прекращения воздействия, то первичные изменения состояния деревьев могут прекратиться, и можно утверждать о вторичном воздействии за счет нападения на неповрежденные деревья ксилофагов, сформировавшихся на погибших деревьях. Обычно при медленном изменении состояния дерева процесс его освоения ксилофагами характеризуется так называемой «скользящей устойчивостью», когда дерево по очереди осваивается разными видами ксилофагов (Исаев, Гирс, 1975). Однако при быстрых сдвигах состояния дерева возможно одновременное его заселение разными видами ксилофагов. Если происходит медленное латентное

ухудшение состояния деревьев после воздействия, то возможно постепенное освоение ксилофагами новых деревьев и разрастание очага, если латентного ухудшения не происходит, то не происходит и расширение очага, возможно только развитие лесного пожара за счет погибших и усохших деревьев. В связи с этим по лесоводственным нормам требуется проведение санитарных рубок погибших и ослабленных деревьев.

Диагностику типа воздействия можно будет провести по временным и пространственным характеристикам реакции деревьев. Например, химический ожог можно будет выявить, классифицируя реакцию деревьев как быструю локальную. Напротив, воздействие фитопатогена будет, скорее всего, медленным интегральным или локальным.

Если ухудшение состояния насаждений было обусловлено воздействием ядохимикатов на расположенные вблизи сельскохозяйственные площади, то возникает вопрос, почему такая реакция не наблюдалась ранее. Вряд ли такое воздействие проводилось впервые. В качестве объяснения появления эффекта воздействия ядохимикатов на лес можно предположить, что воздействие в 2022 г. могло быть обусловлено независимым ухудшением состояния деревьев в 2021 г., когда деревья потеряли устойчивость к внешним воздействиям. И сочетание спонтанного ухудшения состояния деревьев перед возможным воздействием и при самом воздействии могли привести к наблюдаемому результату.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные оригинальные методы оценки состояния древесных растений (высокочастотные спектры первых разностей ШГК, диэлектрические характеристики тканей деревьев, функции отклика величин NDVI в ответ на изменение LST) позволили выявить возможные причины повреждений хвои деревьев в Краснотуранском бору. Отметим, что для сбора данных понадобился один день работы в полевых условиях. Предлагаемый подход позволяет подойти к анализу различных патологических процессов в лесных экосистемах. При этом постоянный дистанционный мониторинг насаждений позволяет выделить зоны повреждения на их начальном этапе. Отдельные типы повреждений (нападение насекомых, пожары, техногенные воздействия и др.) характеризуются специфичной пространственно-временной динамикой дистанционных

показателей, что позволяет уже по дистанционным данным предварительно определить тип повреждения. Далее для уточнения типа воздействия требуется проводить наземные исследования с помощью предлагаемых в работе методов. Такой двухэтапный дистанционный и наземный мониторинг позволяет в кратчайшие сроки выявить зону и тип повреждения, что крайне важно для принятия оперативных решений в практике защиты и охраны лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грязькин А. В., Герасюта С. М., Бернацкий Д. П., Трубочева Т. А., Ковалев Н. В. Изменчивость величины импеданса древесных пород // Изв. СПбЛТА. 2012. № 198. С. 11–17.
- Гусев Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. 118 с.
- Исаев А. С., Гирс Г. И. Взаимодействие дерева и насекомых-ксилофагов (на примере лиственницы сибирской). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 346 с.
- Ковалев А. В., Jakuš R., Пальникова Е. Н., Суховольский В. Г. Диэлектрическая Фурье-спектроскопия в оценке состояния деревьев в очагах массового размножения короедов // Хвойные бореал. зоны. 2016. Т. 34. № 1–2. С. 44–51.
- Коган Ш. М. Электронный шум и флуктуации в твердых телах. М.: Физматлит, 2009. 368 с.
- Коляго С. А. Природные условия и почвенный покров правобережной части Минусинской впадины // Тр. Южн.-Енис. компл. экспед. М., 1954. Вып. 3. С. 284–306.
- Пальникова Е. Н., Свидерская И. В., Суховольский В. Г. Сосновая пяденица в лесах Сибири. Экология, динамика численности, влияние на насаждения. Новосибирск: Наука, 2002. 254 с.
- Правила санитарной безопасности в лесах. Постановление Правительства Российской Федерации от 20 мая 2017 г. № 607. М.: Правительство РФ, 2017.
- Суховольский В. Г., Иванова Ю. Д. Моделирование повреждений и гибели лесных ценозов под воздействием точечных источников загрязнений // Журн. общ. биол. 2018. Т. 79. № 2. С. 148–158.
- Суховольский В. Г., Воронин В. И., Осолков В. А., Ковалев А. В. Экспресс-оценка состояния древесных растений по диэлектрическим характеристикам тканей ствола // ИВУЗ. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 70–85.
- Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
- Feldman Y., Ermolina I., Hayashi Y. Time domain dielectric spectroscopy study of biological systems // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2003. V. 10. Iss. 5. P. 728–753.
- Kovalev A., Soukhovolsky V. Analysis of forest stand resistance to insect attack according to remote sensing data // Forests. 2021. V. 12. Iss. 9. Article number 1188. 13 p.
- Kovalev A., Tarasova O., Soukhovolsky V. G., Ivanova Yu. D. Is it possible to predict a forest insect outbreak? Back-testing using remote sensing data // Forests. 2024. V. 15. Iss. 8. Article number, 1458. 15 p.

- Schanne O. F., Ruiz P., Ceretti E. Impedance measurements in biological cells. N. Y.: John Wiley & Sons, 1978. 430 p.
- Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. 2017. V. 60. P. 49–60.
- Soukhovolsky V. G., Ivanova Yu. D. Modeling of the damage sustained by forest coenoses and their destruction under the impact of point contamination sources // Biol. Bull. Rev. 2019. V. 9. P. 73–82 (Original Rus. Text © V. G. Soukhovolsky, Yu. D. Ivanova, 2018, publ. in Zhurn. obshch. biol. 2018. V. 79. N. 2. P. 148–158).
- Soukhovolsky V. G., Krasnoperova P., Kovalev A., Sviderskaya I., Tarasova O., Ivanova Y., Akhanev Y., Martemyanov V. Differentiation of forest stands by susceptibility to folivores: A retrospective analysis of time series of annual tree rings with application of the fluctuation-dissipation theorem // Forests. 2023. V. 14. Iss. 7. Article number 1385. 12 p.
- Wei W. W. S. Time series analysis. Boston: Addison Wesley, 2006. 614 p.

ENVIRONMENTAL DETECTIVE: WHY DID THE TREES IN KRASNOTURANSKY PINE FOREST DIE?

V. G. Soukhovolsky¹, A. V. Kovalev², P. A. Krasnoperova³, V. V. Soldatov⁴

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

³ Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

⁴ Forest Protection Center of Krasnoyarsk Krai
Akademgorodok, 50a, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

E-mail: soukhovolsky@yandex.ru, sunhi.prime@gmail.com, for_polli@mail.ru, vladimir.soldatow24@yandex.ru

Possible causes of damage to pine stands in Krasnoturansky Bor in 2022 were studied. Remote sensing data and indicators characterizing the current state of trees were used for the analysis. NDVI values of different forest areas were considered and the moment and intensity of tree damage were estimated based on these indicators. The spatial distribution of trees by the level of damage along the selected transect was studied and it was shown that the level of damage decreases linearly with increasing distance to the forest edge. Based on the results obtained, it is assumed that the cause of the damage could be a chemical burn of trees caused by herbicides when treating agricultural land near the forest edge to destroy weeds. The patterns of change in the current state of trees after impacts were studied depending on their state before damage and the state of trees before the impact on the crowns. To assess the current and retrospective states of trees, a set of indicators is proposed, including the characteristics of the spectra of the first differences in the widths of annual rings of trees in the damage zone 2–20 years before the date of damage, dielectric indicators of tree tissues, and response functions of remote characteristics of stands. It is shown that with the same visual state of trees before and after damage, their response to the impact differs significantly and some of the trees of condition category 1 according to visual features should be classified as trees with a certain level of weakening as a result of the impact. The use of a set of methods made it possible to assess the response of trees to the impact depending on their initial state before the impact.

Keywords: pine stands, condition, evaluation, scales, impacts, reaction of the trees.

How to cite: Soukhovolsky V. G., Kovalev A. V., Krasnoperova P. A., Soldatov V. V. Environmental detective: Why did the trees in Krasnoturansky pine forest die? // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 2. P. 57–71 (in Russian with English abstract and references).