

# ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА НАРУШЕНИЙ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ПОСЛЕ ВСПЫШКИ ЧИСЛЕННОСТИ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА

С.М. Султсон<sup>1\*</sup>, Е.И. Пономарев<sup>1, 2</sup>, Е.Г. Швецов<sup>2</sup>,  
П.Д. Третьяков<sup>1, 2</sup>, А.А. Горошко<sup>1</sup>, Н.Н. Кулакова<sup>1</sup>,  
П.В. Михайлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева  
и <sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

\* Эл. почта: sultson2011@yandex.ru

Представлены результаты анализа состояния отдельных участков горно-таежных темнохвойных лесов Сибири в 2018–2020 годах после вспышки численности сибирского шелкопряда *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov (*Lepidoptera: Lasiocampidae*). В работе использованы материалы спутниковой съемки Landsat и Terra/MODIS. Степень нарушенности древостоев в результате дефолиации оценивалась по величине аномалий вегетационного индекса NDVI в сравнении со среднестатистическим уровнем для фоновых ненарушенных участков. Определены ее корреляционные связи с метеопараметрами, лесотаксационными и орографическими характеристиками территории. Формализовано дерево решений, прогнозирующих нарушенность темнохвойных древостоев в заданных условиях, что позволяет оценить ее вероятную степень на различных этапах развития вспышки численности сибирского шелкопряда в горно-таежных темнохвойных лесах Сибири.

**Ключевые слова:** темнохвойная тайга, сибирский шелкопряд, данные дистанционного зондирования, степень нарушенности древостоев, условия произрастания.

## USING REMOTE SENSING FOR FORECASTING DAMAGE TO DARK CONIFEROUS FORESTS AFTER SIBERIAN SILKMOTH OUTBREAK

S.M. Sultson<sup>1\*</sup>, E.I. Ponomarev<sup>1, 2</sup>, E.G. Shvetsov<sup>2</sup>, P.D. Tretyakov<sup>1, 2</sup>, A.A. Goroshko<sup>1</sup>,  
N.N. Kulakova<sup>1</sup>, P.V. Mikhaylov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies and <sup>2</sup> Krasnoyarsk Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk, Russia

\* Email: sultson2011@yandex.ru

The conditions of specific plots of a dark coniferous forest in a mountain taiga region of Siberia in 2018–2020 after an outbreak of Siberian silkmoth *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov (*Lepidoptera: Lasiocampidae*) have been analyzed using Landsat and Terra/MODIS remote sensing data. The degree of defoliation-caused damage to forest stand was evaluated based on deviations of the vegetation index NDVI from the mean value found in undisturbed plots. Correlations between damage degree, meteorological parameters, and forest inventory and orographic characteristics of the territory under study were determined. A solution tree has been constructed for forecasting the possible degrees of damage to dark coniferous forests under defined conditions, which provides for estimating the possible degrees of damage to mountain taiga dark coniferous forests of Siberia at different stages of Siberian silkmoth outbreak development.

**Keywords:** dark coniferous taiga, Siberian silkmoth, remote sensing data, forest stand damage degree, vegetation conditions.

### Введение

Состояние и устойчивость таежных лесов в границах ареалов регулируется естественно-историческими причинами, экологической амплитудой и конкурентными возможностями лесообразователей, а также

внешними, в том числе природными и антропогенными возмущениями [5]. Один из самых значительных природных факторов, влияющих на темнохвойные древостой Сибири, – воздействие сибирского шелкопряда *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov (*Lepidoptera:*

Lasiocampidae) в условиях вспышки его численности. Изучение данного вопроса имеет важное значение в контексте рационального природопользования и стабильного существования экосистем в условиях изменения климата и роста антропогенного вмешательства. В целом, устойчивое природопользование – одна из центральных проблем современной экологии, определяющая взаимоотношения человека с природой и присущая всем природным образованиям [2, 11, 12].

Многие исследователи пришли к выводу о том, что наиболее часто крупные вспышки массового размножения насекомых-филлофагов возникают в определенных типах лесных фитоценозов [3, 6, 13, 14, 23]. Уровень энтоморезистентности древостоев служит одним из ключевых элементов возможности возникновения вспышек массового размножения, а следовательно, и механизма реализации вспышек. В целом известно, что параметры энтоморезистентности древостоев детерминируются широким кругом факторов различного уровня: структурными особенностями древостоев и их возрастом, породным составом; почвенно-эдафическими факторами, температурой, интенсивностью и продолжительностью засух, засухе, степенью ослабленности древостоя различными факторами (антропогенное (техногенное) воздействие, рубка леса, порослевое возобновление и другие) [9].

Очаги массового размножения сибирского шелкопряда в Сибири описаны с конца XIX века и возникают на площадях до 10 миллионов гектар приблизительно через 15 лет [10, 17]. Каждая такая вспышка развивается на протяжении нескольких лет, постепенно увеличивая охваченную площадь [10, 18, 27, 28]. Из трех темнохвойных видов – сосна сибирская *Pinus sibirica*, пихта *Abies sibirica*, ель *Picea obovata* – *P. sibirica* и *A. sibirica* являются предпочитаемыми кормовыми породами для сибирского шелкопряда [8] и при этом крайне неустойчивы к дефолиации. Их массовая гибель обычна при потере уже 25% хвои [4]. Как следствие, при отсутствии защитных мероприятий площадь погибших темнохвойных древостоев после одной только вспышки может достигать нескольких миллионов гектар [10]. Сукцессионные процессы в таких древостоях происходят через смену пород за счет лиственных древостоев. Темнохвойная формация восстанавливается ориентировочно через 150–200 лет [4].

В настоящее время ситуация усугубляется изменениями климата. Возрастание температуры воздуха летнего периода на территории Сибири наблюдается, по крайней мере, с 1970-х годов [16] и прогнозируется в дальнейшем [29]. При этом бореальные биомы являются наиболее чувствительными к таким изменениям [26]. Сочетание стресса, вызванного неблагоприятными изменениями климата, с дефолиацией способно значительно увеличить масштаб негативных последствий повреждения деревьев насекомыми [24]. Одним

из них уже наблюдающихся последствий является активизация вредителей леса [26, 30]. В случае сибирского шелкопряда вероятно, по меньшей мере, обусловленное потеплением расширение ареала и появление вспышек массового размножения значительно севернее границ, в которых они были известны ранее [17].

Очевидное решение, позволяющее снизить экономический и экологический ущерб от дефолиации, – разработка методов раннего обнаружения очагов массового размножения. Это позволит своевременно начать подавление популяций филлофага и уменьшить площадь поврежденных и погибших древостоев [10]. Обзорные данные перспективно получать на основе периодического спутникового мониторинга потенциальных зон повреждения. В этом вопросе активно используются многоспектральные спутниковые данные и спектральные индексы, динамика которых, а также амплитуды относительных отклонений от нормы могут косвенно характеризовать степень нарушения древостоев, уровень дефолиации и развитие процессов усыхания [20, 21, 31]. Анализ спутниковых изображений после начала дефолиации позволяет обнаружить уже нанесенный сибирским шелкопрядом ущерб [20]. В то же время показано [19, 21], что с использованием ряда спектральных индексов можно характеризовать также степень нарушения в условиях дефолиации древостоев даже в условиях менее 50% дефолиации. При этом для верификации и калибровки спутниковых оценок необходимы наземные обследования древостоев, в которых началось нарастание численности *D. sibiricus*, но еще не зафиксированы полная дефолиация и усыхание. В условиях Сибири, где покрытая лесами площадь велика, а дорожная сеть развита слабо, охватить обследованием все леса с преобладанием кормовых пород на практике невозможно. Поэтому для успеха таких обследований необходимо их проведение в древостоях, повреждение которых наиболее вероятно. Таким образом, задачи количественных оценок устойчивости древостоев на сегодня не имеют достаточной степени проработки, изобилуют допущениями и пока не находят широкого практического применения. Однако решения, обобщающие как наземные данные лесоустройства, так и информацию, получаемую методами дистанционного зондирования Земли, могут служить основой для выработки новых технологий контроля древостоев и выявления их устойчивости в условиях различных деструктивных воздействий [7]. Для идентификации уязвимых участков важно получать обобщающий комплекс известных параметров, определяющих локацию, скорость прироста и динамику зоны поражения в случае развития вспышки массового размножения сибирского шелкопряда.

В настоящей работе рассмотрены следующие аспекты проблемы: 1) категоризация состояния отдель-

ных участков темнохвойного леса после воздействия сибирского шелкопряда в условиях вспышки в зоне горно-таежных темнохвойных лесов Сибири в 2018–2020 годах, а также 2) связь степени нарушенности темнохвойных, регистрируемой на основе спутниковой съемки Landsat и Terra/MODIS, и динамики спектрального индекса, с метеопараметрами, лесотаксационными и орографическими характеристиками территории.

### Методика исследований

Район исследования расположен в таежной зоне Саянского лесозащитного района и относится к зоне средней лесопатологической угрозы. Объектом изучения являлась область недавней повышенной активности сибирского шелкопряда в границах темнохвойных южных горно-таежных лесов Восточного Саяна (Ирбейское лесничество Красноярского края). Ландшафтный комплекс характеризуется среднегорным рельефом и территориально относится к Южно-Сибирской горной лесорастительной зоне, Алтае-Саянскому горно-таежному лесному району.

Климат района резко континентальный и находится под влиянием влажных западных воздушных масс летом и сибирского антициклона зимой. Продолжительность вегетационного периода в среднем составляет 149–151 день. Абсолютный минимум температуры в январе:  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , абсолютный максимум в июле:  $+38,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков – около 527 мм. Доминируют темнохвойные насаждения – кедр, пихта, ель (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*, *Picea obovata*), которые составляют в совокупности до 40% лесной территории. Из лиственных (осина *Populus tremula* и береза *Betula spp.*) пород преобладает береза (около 19% всей территории). Светлохвойные – сосняки (*Pinus sylvestris*) и лиственничники (*Larix sibirica*), занимают 16 и 6,5% территории Ирбейского лесничества, соответственно. На северо-западе лесничества до 14% площади не покрыты лесом. Остальные категории растительности – сосна, лиственница и лиственные насаждения в совокупности составляют 3%.

Выполнение исследований основано на использовании спутниковой информации широкого спектрального диапазона и пространственного разрешения – Landsat-8 с разрешением 30 м, Terra/Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с разрешением 250 м, 1000 м – из открытых каталогов спутниковых данных.

Загрузка данных Landsat выполнялась с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), а данных MODIS – с сайта агентства НАСА (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>).

Дополнительно анализировались материалы, отражающие физико-географические и лесорастительные условия, карта растительности (сервис «Vega» Инсти-

тута космических исследований РАН, Москва (<http://pro-vega.ru/maps/>) [1] (рис. 1а), цифровая модель рельефа (ASTER GDEM, версия 3, пространственное разрешение 30 м, <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>) и векторный ГИС-слой лесотаксационных характеристик выделов части Ирбейского лесничества с привязкой к зоне поражения сибирским шелкопрядом.

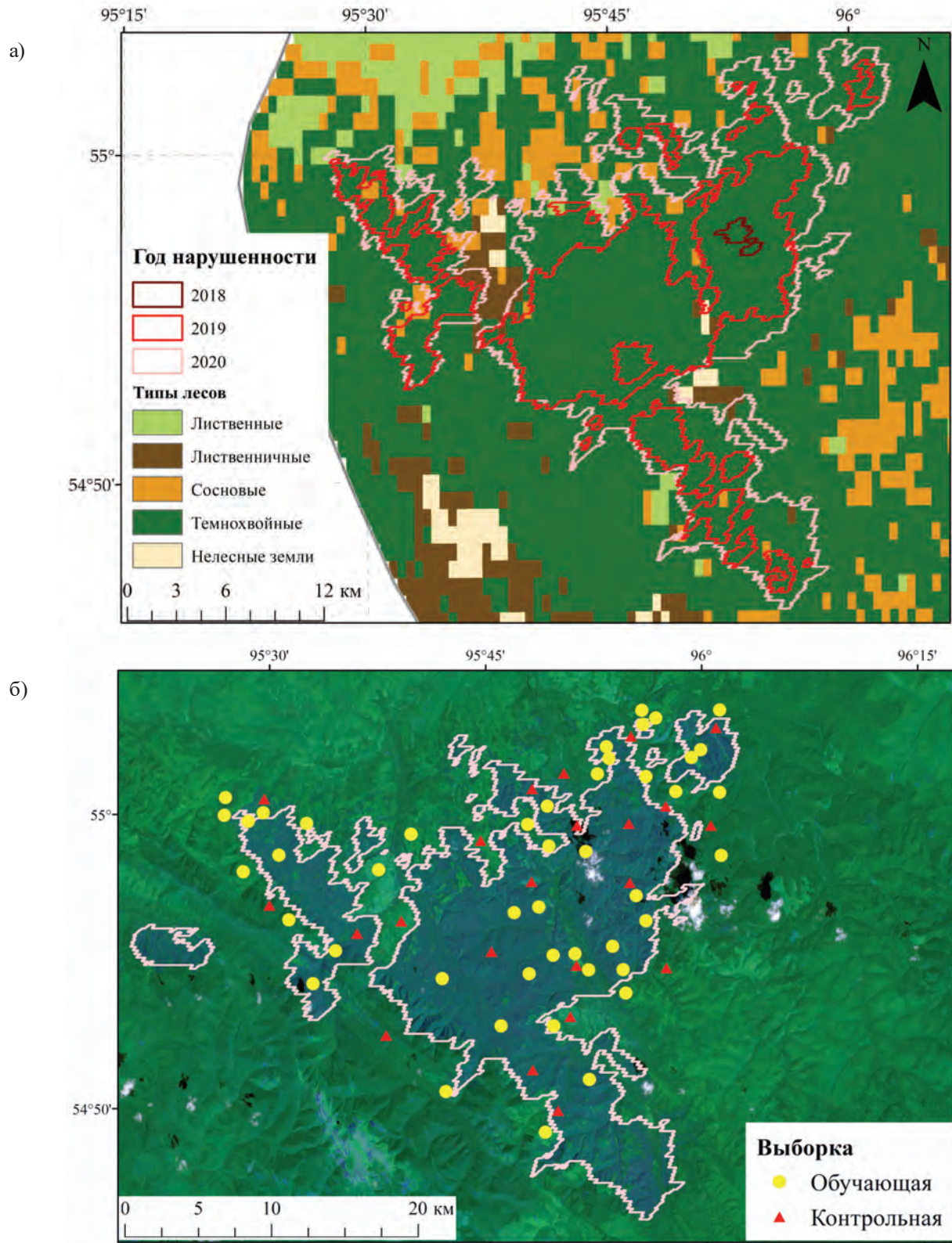
Климатические данные были восстановлены с 1970-х годов с использованием открытых банков данных ре-анализа метеорологической информации по территории исследования (The POWER Project, <https://power.larc.nasa.gov/>, дата обращения: 01.10.2022), а также обобщения за 11 лет до массовой вспышки шелкопряда (2005–2016) и за 5 лет после ее начала по данным ре-анализа (<https://www.globalclimatemonitor.org>, дата обращения: 01.10.2022).

Для оценки степени нарушенности лесов в работе использовался нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), восстановленный из стандартного продукта каталога данных MODIS – MOD13Q1/MYD13Q1 с пространственным разрешением 250 м [15]. Значения индекса NDVI рассчитывались для периода наибольшей фотосинтетической активности растительности – с июня по октябрь каждого года (145–273-й день года). Из последующей обработки были исключены пиксели низкого качества (содержащие облака, тени от облаков и т. д.), после чего были рассчитаны средние значения NDVI.

Анализ нарушений включал два этапа. На первом этапе выполнен анализ применимости аномалии вегетационного индекса NDVI для оценки степени повреждения территории. Данная процедура была основана на попиксельном сопоставлении данных MODIS и данных Landsat более высокого пространственного разрешения.

С помощью классификации данных Landsat по методу максимального правдоподобия были выделены фрагменты территории с изменениями спектральных признаков древостоев, вызванных воздействием шелкопряда. Для классификации использовался композит, включавший данные красного (канал № 4), ближнего инфракрасного (канал № 5) и коротковолнового (канал № 7) каналов Landsat-8. Для классификации данных Landsat с применением метода максимального правдоподобия была сформирована обучающая выборка размером 46 полигонов (площадью от 3 до 10 га) (рис. 1б).

Далее для каждого 250-метрового пикселя MODIS была определена доля пикселя (площади), которая была повреждена шелкопрядом (по данным Landsat). Эта величина рассчитывалась как отношение числа пикселей Landsat, находящихся в пределах одного пикселя MODIS, которые были классифицированы как поврежденные, к общему числу пикселей Landsat в пределах пикселя MODIS. Полученное отношение



**Рис. 1.** Зона поражения территории Ирбейского лесничества. (а) Динамика зоны поражения в 2018–2020 годах на карте растительности. Преобладающие древостои выделены по материалам портала «Vega» Института космических исследований (<http://pro-vega.ru/maps/>). Границы зон поражения выделены по аномалиям NDVI для указанных годов. (б) Расположение участков обучающей и контрольной выборок. Зона поражения отмечена по состоянию на 2020 год

(степень нарушенности) было сопоставлено с величиной аномалии индекса NDVI, определенного по данным MODIS.

На втором этапе с использованием продуктов MODIS оценивалась степень нарушенности отдельных выделов (наименьших таксонов с идентичными характеристиками растительного покрова) Ирбейского лесничества. Выделы с их характеристиками и границами присутствуют в векторном слое таксационных описаний Ирбейского лесничества, который накладывался на материалы съемок средствами геоинформационной системы (ГИС) с открытым кодом QuantumGIS (Quantum Geographic Information System, version 3.16.3, <https://www.qgis.org>, дата обращения: 25.01.2023). Оценка степени нарушенности каждого выдела выполнялась на основании величины отклонения вегетационного индекса NDVI по отношению к состоянию на 2017 год (то есть ненарушенному состоянию до начала вспышки). Степень нарушенности выдела оценивалась как отношение отклонения среднего значения NDVI в пределах выдела после воздействий шелкопряда к среднему значению до возникновения вспышки (аномалия NDVI, %):

$$CH = 100\% * (NDVI_{pre} - NDVI_{post}) / NDVI_{pre}, \quad (1)$$

где: CH – степень нарушенности;  $NDVI_{pre}$  – значения NDVI до воздействия шелкопряда;  $NDVI_{post}$  – значения NDVI после воздействия.

Далее вычисляли количество пикселей с аномалиями NDVI внутри каждого рассматриваемого выдела. Если доля таких пикселей превышала 10% общего числа, то выдел характеризовался высокой степенью нарушенности. При значении  $\leq 10\%$  – низкой.

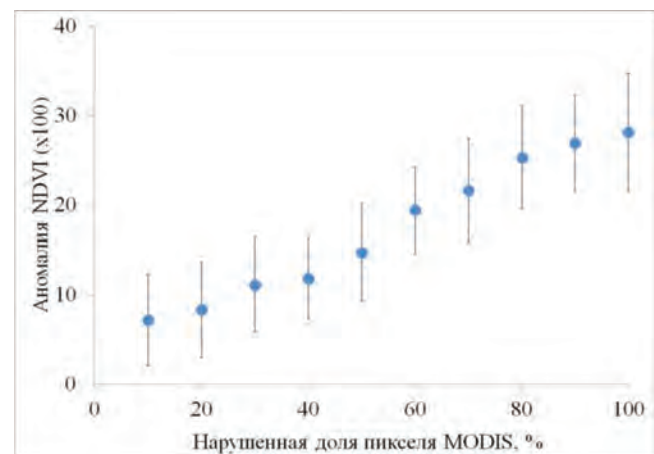
В отдельный класс отнесены ненарушенные выделы ( $< 5\%$ ). В этом случае вариация NDVI не была связана с воздействием шелкопряда. Таким образом, получены векторные ГИС-слои нарушенности лесов Ирбейского лесничества за период 2018–2020 годов (рис. 1а).

В анализе также использованы данные по более чем 2000 выделам с атрибутивной базой таксационных характеристик. Результаты классификации спутниковых съемок анализировались сопряженно с лесотаксационными данными по выделам. Поскольку каждый выдел мог подвергаться воздействию сибирского шелкопряда в течение более чем одного месяца, рассматривался тот месяц, в котором была повреждена наибольшая доля площади выдела. Расчеты выполнялись за каждый месяц периода июнь–октябрь с 2018 по 2020 год. Степень повреждения растительности рассматривалась через относительные аномалии значения показателя вегетационного индекса NDVI от уровня, характерного для ненарушенных участков (участков в состоянии до воздействия шелкопряда) темнохвойной тайги лесничества. Ненарушенные участки темнох-

войных насаждений характеризовались значениями NDVI от 0,77 до 0,84. Критерием для выделения участков с нарушениями древостоев после воздействия шелкопряда было снижение относительных значений показателя NDVI на величину 25–50% статистической нормы для здоровой растительности. Такие пороговые значения обоснованы для задачи такого типа и использовались в ряде работ по теме [20, 21, 31].

## Результаты

Точность результатов классификации данных Landsat оценивалась с помощью выборки, включавшей 22 контрольных полигона (рис. 1б). Для каждого полигона результат определялся на основании того, как было классифицировано (нарушенные или ненарушенные) большинство пикселей внутри полигона. Оценка точности классификации проводилась путем сопоставления полученных оценок для полигонов контрольной выборки с результатами, полученными согласно визуальному экспертному анализу. Анализ показал, что два неповрежденных шелкопрядом участка, расположенных возле русла реки, были ошибочно классифицированы как нарушенные (ошибки первого рода). В то же время случаи ошибок второго рода, когда поврежденные полигоны классифицировались как неповрежденные, не зафиксированы. Таким образом, согласно сформированной контрольной выборке, общая точность классификации составила около 91%.



**Рис. 2.** Соотношение между долей пикселя MODIS, в которой наблюдались признаки нарушенности лесов шелкопрядом, и величиной аномалии NDVI. Плоские погрешности соответствуют одному стандартному отклонению

На рис. 2 показана зависимость между долей пикселя MODIS, классифицированной как нарушенная, и величиной аномалии NDVI. Пиксели MODIS были разделены на 10 классов нарушенности (с шагом 10%) по величине доли пикселя, классифицированной как

нарушенная. Так, пиксели MODIS, для которых доля нарушенности составляла менее 10%, объединялись в одну группу, пиксели, для которых эта величина составляла от 10 до 20%, – в другую и т. д. Для каждой такой группы были рассчитаны среднее значение аномалии NDVI и величина стандартного отклонения. Анализ связи между средней величиной аномалии NDVI, рассчитанной для пикселей MODIS из каждой группы, и долей пикселя, классифицированной как нарушенность по данным Landsat, показал наличие линейной связи между этими переменными ( $r^2 = 0,98$ ,  $p < 0,01$ ). Таким образом, было установлено, что величина аномалии индекса NDVI по данным радиометра MODIS может быть использована в качестве индикатора степени нарушенности лесов в пределах выдела.

Общая площадь зоны, классифицированной по материалам спутниковой съемки как зона поражения за период 2018–2020 годов (рис. 1), составила более 41 тыс. га, что соответствовало территории 2068 выделов в векторном ГИС-слое таксационных характеристик Ирбейского лесничества.

Для оценки вероятной степени нарушенности древостоев сибирским шелкопрядом в отдельных выделах Ирбейского лесничества был проведен анализ корреляционных связей между степенью нарушенности и набором лесотаксационных характеристик по всем выделам Ирбейского лесничества.

В качестве анализируемых лесотаксационных характеристик рассматривались средний возраст, средняя высота и средний диаметр насаждения, породный состав насаждения, преобладающая порода, тип леса, бонитет, а также полнота. Все характеристики насаждений были преобразованы в числовой формат. В частности, для категориальных переменных каждой категории присваивалось числовое значение,

для которого и рассчитывался коэффициент корреляции. В случае породного состава числовое значение рассчитывалось как доля темнохвойных древостоев (кедр, пихта, ель) в насаждении. Результирующая матрица корреляций показана в табл. 1.

Наибольшие коэффициенты корреляции найдены для переменных «средний возраст насаждения» ( $r = 0,38$ ) и «доля темнохвойных пород в пределах выдела» ( $r = 0,43$ ). Для остальных рассмотренных переменных коэффициент корреляции не превышал 0,3.

На рис. 3 показаны гистограммы распределения общего числа выделов, а также числа нарушенных выделов (со степенью нарушенности более 5%) для рассмотренных таксационных характеристик. Основную часть (более 85%) нарушенных выделов составили выделы с долей темнохвойных древостоев более 50% (рис. 3а). В 80% нарушенных выделов преобладали пихтовые или кедровые древостои (рис. 3е). В основном поражались древостои возрастом более 100 лет (84%) (при этом на выделы со средним возрастом древостоев от 100 до 150 лет пришлось 47% всех нарушенных выделов), высотой от 18 до 27 м (89%) и диаметром от 18 до 36 см (83%). В 95% поврежденных выделов древостои имели бонитет 3–4.

Таким образом, было установлено, что такие переменные, как доля темнохвойных пород в насаждении, бонитет, а также средний возраст древостоя в пределах выдела коррелируют со степенью нарушенности лесов.

В анализе связи орографических характеристик выделов со степенью нарушенности сибирским шелкопрядом были рассмотрены следующие переменные: средняя высота выдела над уровнем моря, экспозиция и крутизна склонов. Корреляционные связи этих факторов со степенью нарушенности незначительны (табл. 2).

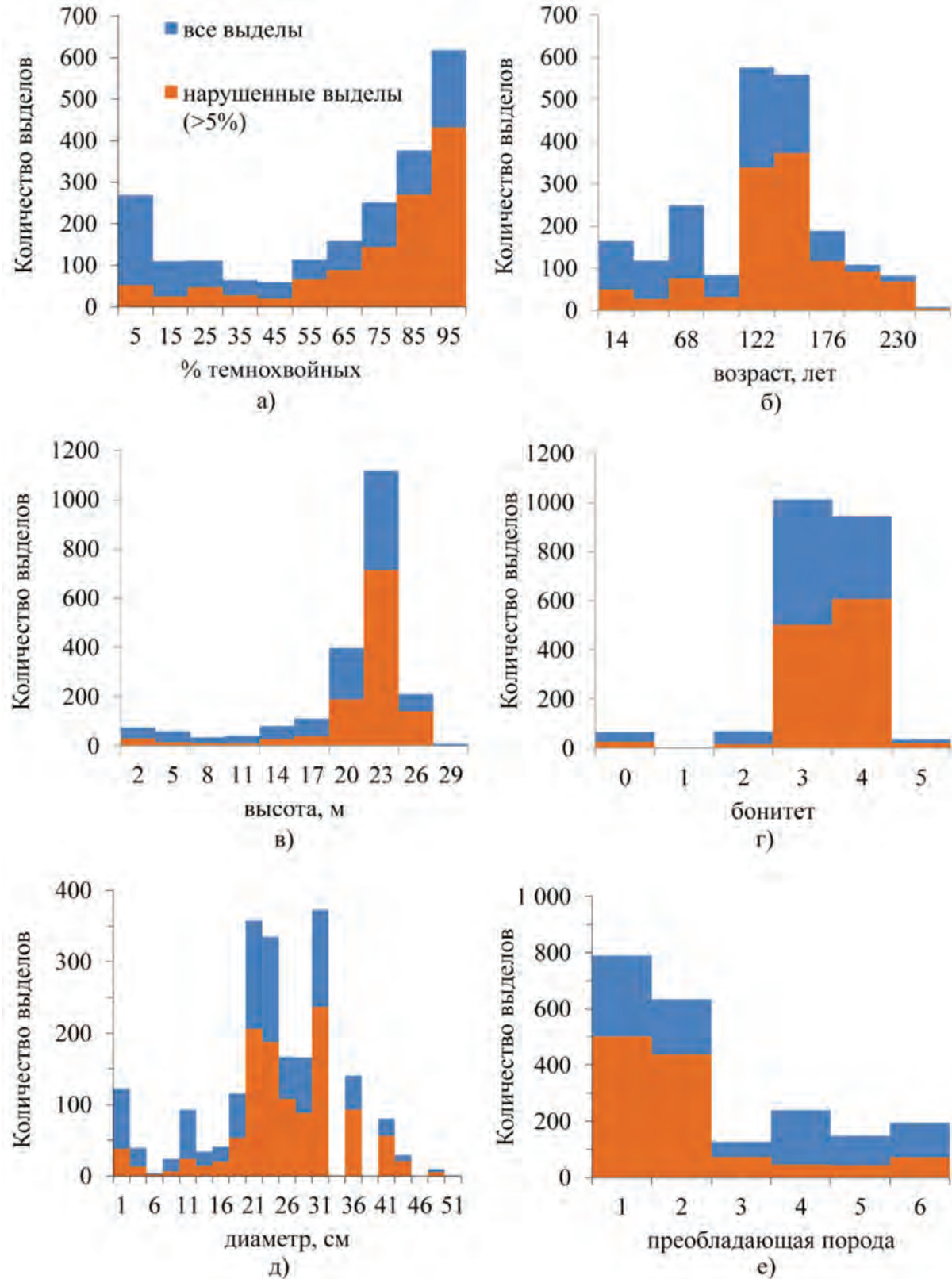
Табл. 1

**Результаты корреляционного анализа связи лесотаксационных характеристик выделов и степени нарушенности насаждений (СН), определенной на основе индекса NDVI**

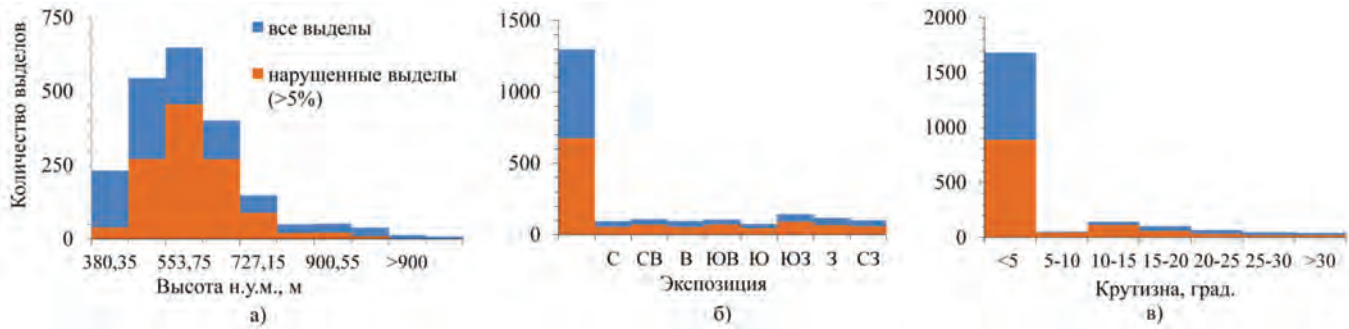
	Возраст	Высота	Диаметр	ПП*	ТХВ**	Тип леса	Бонитет	Полнота	СН
Возраст	1,00								
Высота	0,80	1,00							
Диаметр	0,84	0,87	1,00						
ПП*	–0,42	–0,37	–0,16	1,00					
ТХВ**	0,64	0,50	0,42	–0,78	1,00				
Тип леса	0,34	0,33	0,38	–0,06	0,17	1,00			
Бонитет	0,51	0,45	0,33	–0,47	0,47	0,14	1,00		
Полнота	0,28	0,53	0,38	–0,32	0,29	0,25	0,41	1,00	
СН	0,38	0,27	0,24	–0,35	0,43	0,06	0,25	0,14	1,00

\* Преобладающая порода в выделе.

\*\* Доля темнохвойных пород в составе древостоя.



**Рис. 3.** Гистограммы распределения числа выделов для различных лесотаксационных переменных. Показаны гистограммы для нарушенных (степень нарушенности более 5%) выделов. Преобладающие породы: 1 – пихта; 2 – кедр; 3 – ель; 4 – береза; 5 – осина; 6 – нет данных



**Рис. 4.** Гистограммы распределения числа выделов в зависимости от орографических характеристик: а) высота над уровнем моря; б) экспозиция склона; в) крутизна склона

Табл. 2

**Матрица корреляций орографических характеристик выделов и степени нарушенности (СН)**

	Крутизна	Высота	Экспозиция	СН
Крутизна	1,00			
Высота	0,36	1,00		
Экспозиция	0,56	0,31	1,00	
СН	0,01	0,03	0,08	1,00

Табл. 3

**Матрица корреляций метеорологических переменных и степени нарушенности (СН)**

	Темп.	Осадки	Темп. пред.	Осадки пред.	СН
Темп.	1,00				
Осадки	-0,34	1,00			
Темп. пред.	0,49	-0,08	1,00		
Осадки пред.	0,40	0,32	-0,29	1,00	
СН	0,66	0,27	0,48	0,25	1,00

Распределение числа выделов, нарушенных шелкопрядом, хорошо согласовывалось с распределением общего числа выделов (рис. 4). Треть всех выделов (>33%) располагалась на высотах от 500–700 м н.у.м., на равнинных участках. При этом на 40% этих выделов фиксировались нарушения шелкопрядом. В то же время можно отметить влияние рельефа местности в качестве ограничивающего фактора при распространении шелкопряда, например, высоты более 900 м.

В табл. 3 приведена матрица корреляций между степенью повреждения выдела шелкопрядом и метеорологическими переменными текущего месяца, а также предыдущего месяца (темп. пред., осадки пред.).

Наибольшие коэффициенты корреляции наблюдались для температуры воздуха в текущем месяце ( $r = 0,66$ ) и температуры воздуха предыдущего месяца ( $r = 0,48$ ). В целом, можно отметить, что в период с августа по октябрь 2018–2020 годов на территории исследования наблюдались положительные аномалии тем-

пературы воздуха (на уровне  $\sim 1,2^\circ\text{C}$ ). Коэффициенты корреляции для аномалий количества осадков были существенно ниже.

На основе результатов корреляционного анализа были выделены факторы, имевшие наиболее существенную связь со степенью нарушенности древостоев района исследований. В качестве таких факторов рассматривались средний возраст древостоя, доля темнохвойных пород, бонитет, а также температура воздуха за текущий и предыдущий месяцы. В качестве зависимой выходной переменной рассматривалась степень нарушенности лесов, рассчитанная по данным MODIS.

Результирующее уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$СН = 0,1 \times \text{Возраст} + 0,19 \times \text{ТХВ} + 2,87 \times \text{Бонитет} + 28,54 \times \text{Темп} + 9,86 \times \text{Темп. пред.} - 16,25, \quad (2)$$



где: СН – вероятная степень нарушенности; Возраст – средний возраст насаждения в пределах выдела (лет); ТХВ – доля темнохвойных пород (0–100%); Бонитет – бонитет; Темп. – аномалия температуры воздуха в текущем месяце (°С); Темп. пред. – аномалия температуры воздуха в предыдущем месяце (°С).

Коэффициент детерминации многофакторного регрессионного анализа модельного решения и оценок нарушенности по спутниковым данным составил  $R^2 = 0,53$ .

Хотя уравнение (2) описывает общую связь между степенью нарушенности и рассмотренными переменными, можно выделить также аналогичные уравнения связи для отдельных этапов развития вспышки.

Корреляционный анализ показал, что самостоятельное решение может быть сгенерировано с учетом этапности развития вспышки с прогнозируемым уровнем воздействия энтомовредителей на древостой, а также с учетом различной значимости факторов влияния, указанных в уравнении 2.

Так, на территории Ирбейского лесничества на основе анализа спутниковых данных были выделены три этапа развития зоны повреждения (рис. 1): этап 1 – начальная фаза (по съемкам на конец вегетационного сезона 2018 года), этап 2 – экспоненциальный прирост площади нарушений, выявленный на конец сезона 2019 года, и этап 3 – финальная стадия повреждения по состоянию на 2020 год. Для каждого этапа также было рассмотрено влияние указанных выше переменных на вероятную степень нарушенности (СН) в пикселях изображения. В общем виде уравнение, используемое для оценки вероятной степени нарушенности, можно записать так:

$$СН = А \times \text{Возраст} + В \times \text{ТХВ} + С \times \text{Бонитет} + D \times \text{Темп} + E \times \text{Темп. пред.} + F. \quad (3)$$

Уравнение 3 содержит набор коэффициентов (табл. 4), полученных методом поиска решений (стандартные надстройки пакета MS Office) с оптимизацией результата в привязке к степени нарушенности древостоев в терминах аномалии вегетационного индекса (NDVI). Как было описано выше, пороговое значение 10%, разделяющее классы нарушенности (КН), отражает фактическое распределение вегетационных аномалий в границах анализируемых выделов Ирбейского лесничества в 2018–2020 годах.

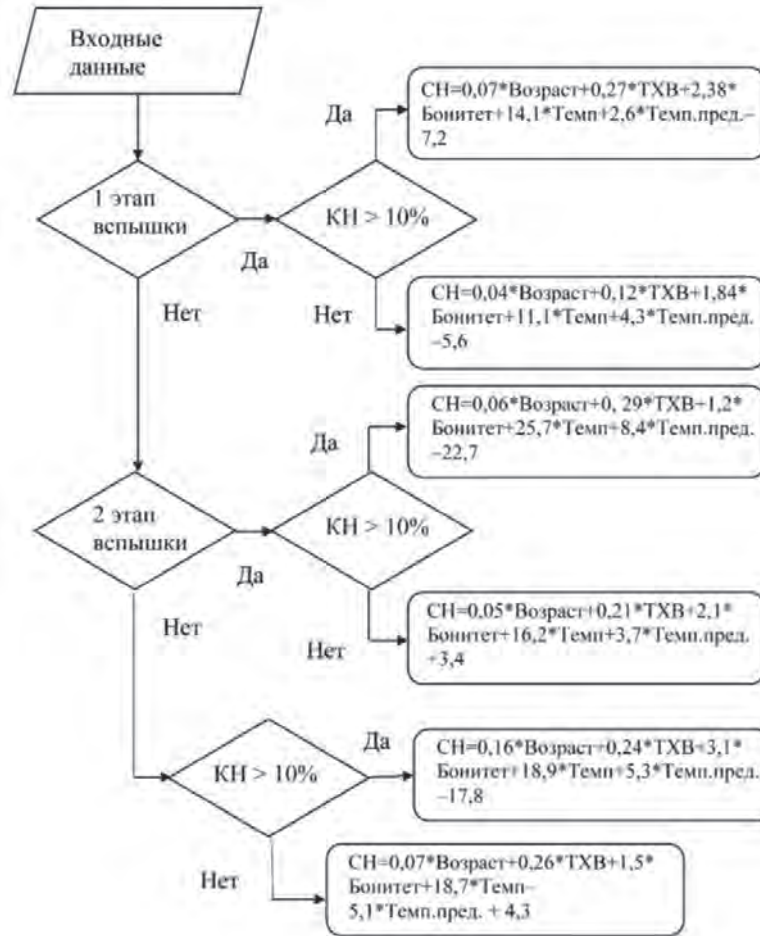
Общий вид модели и набор коэффициентов, реализующих решение, необходимо выбирать в соответствии с дополнительными условиями. На рис. 5 приведено дерево решений для расчета степени нарушенности (СН) применительно к заданному сценарию на различных этапах развития вспышки с выбором вероятного класса повреждения древостоя (КН) по аномалиям спектральных признаков: зона нарушенности в границах выдела составит  $КН > 10\%$ , зона нарушенности в границах выдела составит  $КН \leq 10\%$  (преимущественно не подвергшиеся воздействию шелкопряда выделы темнохвойных насаждений).

Все последние исследования [19, 22, 27, 28] по этому вопросу констатируют, что решение проблемы прогнозирования вспышки шелкопряда и развития зоны поражения сопряжено с высоким уровнем неопределенности и уникальности в каждом отдельном случае. Наибольшую трудность представляет прогноз начала вспышки. Модельные решения для каждого уникального события требуют большого количества входной информации [22, 25, 27, 28]. Кроме того, потребуются также знания о вероятных сценариях развития вспышки, доступные только при полевых наблюдениях в конкретных условиях, а значит, фрагментарные. Однако подходы к оценке степени нарушенности древостоев, как и общие закономерности корреляционных связей с внешними параметрами, на наш взгляд, универсальны. Дополнительное преимущество исполь-

Табл. 4

**Коэффициенты уравнений, соответствующие разным этапам развития вспышки численности сибирского шелкопряда и классам нарушенности древостоев**

Этап	Класс нарушенности выдела (КН)	Коэффициенты					
		А	В	С	Д	Е	Ф
1	Низкий	0,04	0,12	1,84	11,1	4,3	–5,6
	Высокий	0,07	0,27	2,38	14,1	2,6	–7,2
2	Низкий	0,05	0,21	2,1	16,2	3,7	3,4
	Высокий	0,06	0,29	1,2	25,7	8,4	22,7
3	Низкий	0,07	0,26	1,5	18,7	–5,1	4,3
	Высокий	0,16	0,24	3,1	18,9	5,3	–17,8



**Рис. 5.** Дерево решений для расчета степени нарушенности (СН) на различных этапах развития вспышки численности сибирского шелкопряда с выбором вероятного класса повреждения древостоя (КН): зона нарушенности древостоя в границах выдела составит  $КН > 10\%$ , зона нарушенности в границах выдела составит  $КН \leq 10\%$

зования спутниковых данных состоит в возможности отслеживать эволюцию вспышки и ее влияние на состояние древостоев с течением времени. Таким образом, и подходы, описанные в этой статье, и общий вид полученных решений вполне применимы и к другим событиям вспышки численности шелкопряда на территориях горной темнохвойной тайги Сибири.

### Заключение

В результате проведенных исследований представлен алгоритм оценки устойчивости отдельных участков леса к воздействию сибирского шелкопряда в случае развития вспышки в границах горно-таежных темнохвойных лесов. Проведенный анализ подтвердил возможность применения набора выявленных параметров для прогноза состояния участков темнохвойных насаждений в условиях воздействия шелкопряда. Предложенное решение (с пороговым значением  $КН = 10\%$ ) позволяет разделять участки с вероятными значительными нарушениями темнох-

войных древостоев и, преимущественно, не подвергшиеся воздействию шелкопряда выделы темнохвойных насаждений (при  $КН \leq 10\%$ ). Разработана система модельных решений, описывающих влияние наиболее значимых факторов на развитие вспышки в заданном пространстве выделов с привязкой к степени нарушенности древостоев (в терминах вегетационной аномалии) с достоверностью не ниже  $R^2 = 0,53$ . Формализованное дерево решений, прогнозирующих нарушенность темнохвойных древостоев в заданных условиях, можно использовать для вероятностных оценок степени нарушенности на различных этапах развития вспышки сибирского шелкопряда в горно-таежных темнохвойных лесах Сибири.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Защита леса» проекта «Фундаментальные основы защиты лесов от энтомо- и фитовредителей в Сибири» (№ FEFE-2020-0014).*

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Барталев СА, Егоров ВА, Жарко ВО, Лупян ЕА, Плотников ДЕ, Хвостиков СА, Шабанов НВ. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН; 2016.
2. Бех ИА, Данченко АМ. Параметры устойчивости темнохвойно-кедровых лесов равнинной тайги Западной Сибири. Вестн Томск гос ун-та. Биол. 2008;1(2):57-62.
3. Воронцов АИ. Патология леса. М.: Лесная промышленность; 1978.
4. Гродницкий ДЛ, Разнобарский ВГ, Солдатов ВВ, Ремарчук НП. Деградация древостоев в таежных шелкопрядниках. Сиб экол журн. (2002);9(1):3-12.
5. Ермоленко ПМ, Овчинникова НФ. Устойчивость темнохвойных лесов Западного Саяна. В кн.: Методы оценки состояния и устойчивости лесных экосистем. Красноярск; 1999:57-8.
6. Ильинский АИ. Непарный шелкопряд и меры борьбы с ним. М.: Гослесбумиздат; 1959.
7. Исаев АС, Ряполов ВЯ. Анализ ландшафтно-экологической приуроченности очагов сибирского шелкопряда с применением аэрокосмической съемки. В кн.: Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами. Новосибирск: Наука; 1979. С. 152-67.
8. Кириченко НИ, Баранчиков ЮН. Кормовые нормы гусениц сибирского шелкопряда на хвойных породах Сибири. Сиб экол журн. 2008;(5):709-16.
9. Колтунов ЕВ, Бахвалов СА, Мартемьянов ВВ. Факторы и экологические механизмы популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2010.
10. Кондаков ЮП. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда. В кн.: Экология популяций лесных животных Сибири. Новосибирск: Наука; 1974. С. 206-65.
11. Куприянова ТМ. Обзор представлений об устойчивости физико-географических систем. В кн.: Устойчивость геосистем. М.: Наука; 1983. С. 7-13.
12. Матюк ИС. Устойчивость лесонасаждений. М.: Лесная промышленность; 1983.
13. Распопов ПМ. Массовые размножения хвое- и листогрызущих насекомых в Челябинской области с 1949 по 1973 г. и меры борьбы с ними. В кн.: Биологические исследования в Ильменском заповеднике. Свердловск: УНЦ АН СССР; 1973. С. 83-97.
14. Ханисламов МГ. Динамика численности непарного шелкопряда в связи с условием пита-

ния и погоды. Первая межвузовская конференция по защите леса: тез. докл. М.: Изд. МВУ СССР и МЛТИ; 1958. С. 11-2.

### Общий список литературы/References

1. Bartalev SA, Yegorov VA, Zharko VO, Lupian YeA, Plotnikov DYe, Khvostikov SA, Shabanov NV. Sputnikovoye Kartografirovaniye Rastitelno-go Pokrova Rossii. Moscow: IKI RAN; 2016. (In Russ.)
2. Bekh IA, Danchenko AM. [Stability parameters of dark-coniferous cedar forests of the plain taiga of West Siberia]. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Biologiya. 2008;1(2):57-62. (In Russ.)
3. Vorontsov AI. Patologiya Lesa. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1978. (In Russ.)
4. Grodnickiy DL, Raznobarskiy VG, Soldatov VV, Remarchuk NP. [Tree stand degradation in Siberian silk moth-affected forests]. Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal. 2002;9(1):3-12. (In Russ.)
5. Yermolenko PM, Ovchinnikova NF. [Stability of dark coniferous forests of Western Sayan Mountains]. In: Metody Otsenki Sostoyaniya i Ustoychivosti Lesnyh Ekosistem. Krasnoyarsk; 1999. P. 57-8. (In Russ.)
6. Ilyinskiy AI. Neparnyi Shelkopriad i Mery Borby s Nim. Moscow: Goslesbumizdat; 1959. (In Russ.)
7. Isayev AS, Riapolov VYa. [Using aerospace photography for analysis of the association of Siberian silk moth foci with ecological landscapes]. In: Issledovaniye Tayozhnykh Landshaftov Distantcionnymi Metodami. Novosibirsk; Nauka; 1979. P. 152-67. (In Russ.)
8. Kirichenko NI, Baranchikov YuN. [Forage norms of Siberian silk moth larvae feeding on coniferous species of Siberia]. Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal. 2008;(5):709-16. (In Russ.)
9. Koltunov YeV, Bakhvalov SA, Martemyanov VV. Faktory i Ekologicheskiye Mekhanizmy Populiatcionnoy Dinamiki Lesnyh Nasekomyh-Fillofagov. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN; 2010. (In Russ.)
10. Kondakov YuP. [Regularities in Siberian silk moth outbreaks]. In: Ekologiya Populiatciy Lesnykh Zhivotnykh Sibiri. Novosibirsk: Nauka; 1974. P. 206-65. (In Russ.)
11. Kupriyanova TM. [A review of concepts related to physical-geography systems stability]. In: Ustoychivost Geosistem. Moscow: Nauka; 1983. P. 7-13. (In Russ.)
12. Matiuk IS. Ustoychivost Lesonasazhdeniy. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1983. (In Russ.)

13. Raspopov PM. [Outbreaks of needles and leaves consuming insects in Chelyabinsk Oblast in 1949 through 1973 and measures taken against them]. In: Biologicheskiye Issledovaniya v Ilmenskom Zapovednike Sverdlovsk: UNTs AN SSSR; 1973. P. 83-97. (In Russ.)
14. Khanislamov MG. [Changes in spongy moth abundance related to nutritional and climatic conditions]. In: Pervaya Mezhvuzovskaya Konferentsiya po Zashchite Lesa Tezisy Dokladov. Moscow: Izdatel'stvo MVU SSSR i MLTI; 1958. P. 11-2. (In Russ.)
15. Didan K, Munoz AB, Solano R, Huete A. MODIS Vegetation Index User's Guide Version 3.00, June 2015 (Collection 6).
16. Gorbatenko VP et al. Effect of atmospheric circulation on temperature variations in Siberia. Atmos Ocean Opt. 2011;24(1):15-21.
17. Kharuk VI, Antamoshkina OA. Impact of silkmoth outbreak on taiga wildfires. Contemp Probl Ecol. 2017;10(5):556-62.
18. Kharuk VI, Demidko DA, Fedotova YeV, Dvinskaya ML et al. Spatial and temporal dynamics of Siberian silkmoth large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in Altai. Contemp Probl Ecol. 2016;9(6):711-20.
19. Kharuk VI, Im ST, Soldatov VV. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains. J Mountain Sci. 2020;(17):1891-900.
20. Kharuk VI, Ranson KJ, Kozuhovskaya AG, Kondakov YP, Pestunov IA. NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmoth outbreaks in eastern Siberia. Int. J. Remote Sens. 2004;25(24):5543-55.
21. Knyazeva, SV, Koroleva NV, Eidlina SP, Sochilova YeN. Health of vegetation in the area of mass outbreaks of Siberian moth based on satellite data. Contemp Probl Ecol. 2019;12(7):743-52.
22. Kovalev A, Soukhovolsky V. Analysis of forest stand resistance to insect attack according to remote sensing data. Forests. 2021;12(9):1188.
23. Mattson WJ. Escalating anthropogenic stresses on forest ecosystems: forcing benign plant-insect interactions into new interaction trajectories. In: World Forest Congress. Finland; 1997. P. 1-6.
24. Niinemets Ü. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. Forest Ecol Manag. 2010;260(10):1623-39.
25. Pavlov IN, Litovka YA, Golubev DV, Astapenko SA, Chromogin PV. New outbreak of *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. in Siberia (2012–2017): monitoring, modeling and biological control. Contemp Probl Ecol. 2018;11(4):406-19.
26. Seidl R et. al. Forest disturbances under climate change. Nat Clim Chang. 2017;7(6):395-402.
27. Sultson SM, Goroshko AA, Mikhaylov PV, Demidko DA, Ponomarev EI, Verkhovets SV. Improving the monitoring system. In: Towards Early Detection and Prediction of the Siberian Moth Outbreaks in Eastern Siberia. Proceedings, 2021. P. 68.
28. Sultson SM, Goroshko AA, Verkhovets SV, Mikhaylov PV, Ivanov VA, Demidko DA, Kulakov SS. Orographic factors as a predictor of the spread of the Siberian silk moth outbreak in the mountainous southern taiga forests of Siberia. Land. 2021; 10(2):1-16.
29. Tchebakova NM, Parfenova Ye, Soja AJ. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate. Environ Res Lett. 2009;(4):045013.
30. Teshome DT, Zharare GE, Naidoo S. The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate. Front Plant Sci. 2020;(11):601009.
31. Zhirin VM, Knyazeva SV, Eydlina SP. Long-term dynamics of vegetation indices in dark coniferous forest after Siberian moth disturbance. Contemp Probl Ecol. 2016;9:834-43.