

Картографирование усыхания хвойных лесов по данным дистанционного зондирования Земли на примере лесов хребта Хамар-Дабан

М. В. Цыдыпова

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Москва, 109028, Россия
E-mail: ecovie@mail.ru*

Представлена методика картографирования усыхания хвойных лесов, основанная на интеграции методов автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли, вегетационных индексов, дистанционных данных о наземной биомассе Biomass CCI (*англ.* Climate Change Initiative) и материалов наземных лесопатологических обследований на примере лесов хребта Хамар-Дабан (Республика Бурятия). Актуальность исследования обусловлена распространением усыхания темнохвойных лесов на территории исследования и необходимостью эффективного мониторинга их состояния и динамики деградационных процессов. В качестве исходных данных применялись мультиспектральные спутниковые снимки Sentinel-2. Для автоматизированного выделения очагов усыхания использован метод классификации с обучением на основе эталонных участков, определённых по наземным данным. Проведена оценка площадей усыхания хвойных лесов в период с 2017 по 2024 г. на участке исследования. На основе глобальных данных Biomass CCI за 2015–2022 гг. выполнен анализ пространственно-временных трендов, выявивший соответствие области снижения биомассы очагам усыхания лесов на тестовом участке. Представленный комплексный подход позволяет повысить точность и информативность мониторинга усыхания хвойных лесов и может быть интегрирован в лесопатологические системы контроля.

Ключевые слова: усыхание хвойных лесов, дистанционное зондирование, методы автоматизированной классификации, данные Biomass CCI о наземной биомассе

Одобрена к печати: 14.04.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-263-275

Введение

Лесные экосистемы Российской Федерации играют важнейшую роль в поддержании экологического баланса, биоразнообразия и климатической стабильности региона. Однако в последние десятилетия наблюдается значительная деградация и гибель лесных насаждений, что вызывает серьёзную обеспокоенность научного и экспертного сообщества. Согласно данным государственного лесопатологического мониторинга, в течение десяти месяцев 2024 г. в Российской Федерации погибло 71,5 тыс. га лесных насаждений. Основными факторами ухудшения состояния лесов выступают пожары, неблагоприятные погодные условия, антропогенное воздействие, болезни и вредители (<https://rosleshoz.gov.ru/upload/iblock/5e0/mvgyr-52iss6kwwwwe56wfy1fjnf7p1.pdf>).

В Республике Бурятия площадь насаждений с наличием усыхания на конец 2024 г. составила 89 998,7 га. Особенно широко усыхание темнохвойных лесов распространено на байкальских склонах хребта Хамар-Дабан (массивы с неудовлетворительным санитарным состоянием выявлены в Бабушкинском, Кабанском, Гусиноозерском лесничествах общей площадью более 13 тыс. га) (Обзор..., 2025).

Первые сведения об исследовании усыхания хвойных лесов на Хамар-Дабане представлены в работах В.И. Воронина с соавторами (1986), Р.А. Зиганшина с коллегами (1986), Ю.М. Карбаинова и В.Н. Моложникова (1983), Карбаинова (1984), А.А. Рожкова и В.Т. Козака (1989). Оценке динамики усыхания темнохвойных лесов на территории Байкальского заповедника посвящены публикации Н.А. Беловой, Т.И. Морозовой (2016, 2018). Исследования последних десятилетий выявили комплекс причин усыхания, включая водный стресс, обусловленный возрастанием засушливости климата, распространение

грибковых заболеваний и насекомых-вредителей, а также антропогенное влияние, выражающееся в лесозаготовках и пожарах. Большая часть поражённых древостоев располагается в средней и верхней полосе горно-таёжного пояса в восточной и западной областях Хамар-Дабана (Воронин и др., 2019, 2020; Морозова и др., 2005; Ставников, 2013; Харук и др., 2016; Черпаков, 2019).

Важным инструментом в мониторинге состояния лесов становятся методы обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для обнаружения усыхания лесов наиболее широко применяются подходы, основанные на анализе вегетационных индексов, рассчитанных по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat, Sentinel-2 и их временным рядам (Девятова и др., 2007; Катковский и др., 2022; Князева и др., 2019; Харук и др., 2005). Также применяется сочетание этих методов с автоматизированным дешифрированием данных ДЗЗ (Алексеев, Черниковский, 2024; Hart, Veblen, 2015). Анализ временных рядов спутниковых снимков позволяет выявлять как резкие изменения в лесном покрове (например, рубки или гари), так и более постепенные процессы, такие как усыхание лесов (Kennedy et al., 2010; Potočník Buhvald et al., 2025). Однако эффективность указанных методов ограничивается рядом общих проблем: необходимостью наличия качественных эталонных данных, риском недообучения или переобучения моделей, а также сложностью формирования репрезентативных временных рядов снимков. Важное ограничение, отмеченное в обзоре Я. Гао с соавторами (Gao et al., 2020), состоит в том, что существующие методы часто ограничиваются картографированием площадей нарушений, оставляя без внимания анализ потерь биомассы.

Цель настоящего исследования заключается в разработке методики картографирования усыхания хвойных лесов, позволяющей определять не только пространственное распределение усыхающих лесов и их площадь, но и оценивать связанное с ним снижение надземной древесной биомассы на примере лесов хребта Хамар-Дабан.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования стали леса на территории Бабушкинского лесничества Республики Бурятия. Лесничество расположено в юго-восточной части побережья озера Байкал и включает северные склоны хребта Хамар-Дабан. Выбор тестового участка исследования (площадь участка — 7124 га) обусловлен ранее выявленными очагами усыхания темнохвойных лесов, а также доступностью детальных материалов лесопатологических обследований, проведённых в 2021–2022 гг., которые могут служить референсными данными для обучения и валидации моделей*. Местоположение Бабушкинского лесничества, Байкальского заповедника, тестового участка представлено на *рис. 1* (см. с. 265).

На территорию исследования отобраны снимки Landsat TM (*англ.* Thematic Mapper), ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), OLI (*англ.* Operational Land Imager) (1989–2024), Sentinel-2 (2017–2024), а также данные Biomass CCI (*англ.* Climate Change Initiative), представляющие собой растры оценок надземной биомассы (тонна на гектар) с пространственным разрешением 100 м за 2015–2022 гг.

Спутниковый мониторинг лесов Хамар-Дабана осложняется сложным горным рельефом и высоким количеством осадков в летний период. Преобладающие северо-западные ветры переносят насыщенные влагой массы воздуха с Байкала к южному побережью, где они задерживаются северным склоном хребта Хамар-Дабан (<https://docs.cntd.ru/document/438878746/titles/1198A0P>). В летние месяцы в период с 2014 по 2024 г. на территорию исследования доля пригодных для анализа безоблачных снимков Landsat и Sentinel-2 (облачность менее 10 %) составила не более 30 %, что ограничивает построение непрерывных временных рядов. В связи с этим в основу методики положен сравнительный анализ парных разновременных снимков.

* Данные получены с геопортала «Природа Бурятии» (<https://priroda-rb.ru/resource/1/display?panel=layers>).

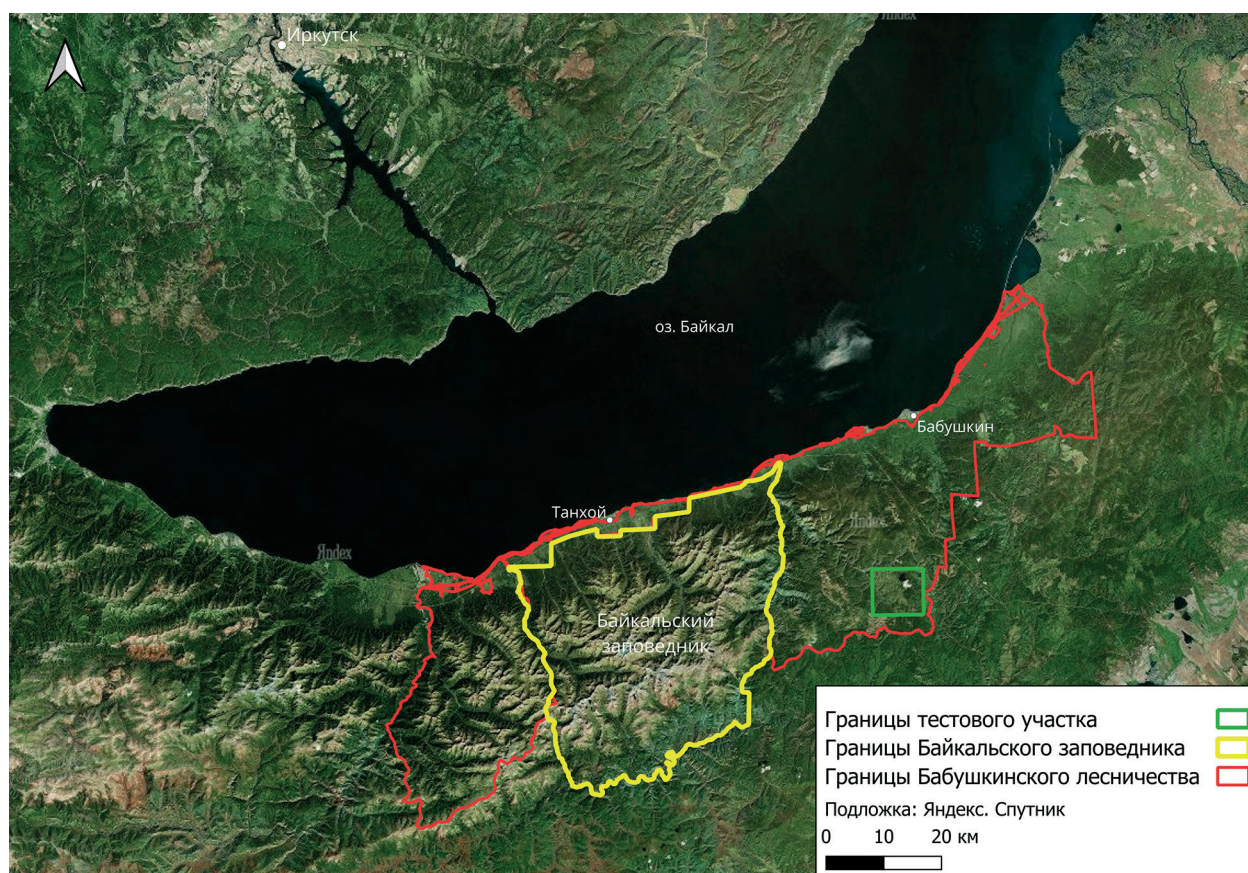


Рис. 1. Местоположение Бабушкинского лесничества, Байкальского заповедника, пробных площадей лесопатологических обследований

При дешифрировании данных ДЗЗ использовались материалы государственной инвентаризации лесов Бабушкинского лесничества, отображающие породный состав, возраст насаждений и другие таксационные характеристики. Картографирование усыхания хвойных лесов проводилось на основе автоматизированного дешифрирования с обучением фрагментов двух безоблачных снимков со спутника Sentinel-2 (2017 и 2024 гг.) на летний период на тестовом участке.

Для создания обучающих эталонов классификации использовались данные наземных лесопатологических обследований 2021–2022 гг. (координаты пробных площадок с выявленным усыханием хвойных лесов), которые применялись для выявления характерных спектральных и текстурных признаков усыхающих хвойных насаждений на снимках Sentinel-2. Координаты полевых точек, соответствующих усыхающим древостоям, были наложены на спутниковые снимки Sentinel-2 за 2017 и 2024 гг. (рис. 2, см. с. 266). На основе визуального анализа снимков в окрестностях этих точек созданы обучающие полигоны (эталон), имеющие схожие признаки усыхания (изменение цвета, текстуры, снижение яркости и др.). Для набора эталонов для снимка 2017 г. использовались только те пробные площадки, где визуально проявлялись признаки усыхания лесов на снимке, не брались в рассмотрение площадки со слабой степенью усыхания по данным на 2021–2022 гг. Таким образом, для каждого анализируемого года (2017 и 2024) был создан отдельный набор обучающих эталонов класса усыхающие хвойные леса, соответствующий условиям съёмки и фенологическому состоянию растительности, но основанный на единых диагностических критериях, верифицированных в полевых условиях, что обеспечило сопоставимость результатов классификации во времени.

В качестве дополнительных источников информации для создания эталонов других классов объектов использовались лесоустроительные материалы, космические снимки с сервисов World View ESRI (англ. Environmental Systems Research Institute), Яндекс Карты (визуально

идентифицируются участки усыхания хвойных лесов), разновременные данные со спутников Landsat, Sentinel (за предыдущие периоды выявлялись гари и рубки).

На основе имеющихся данных созданы и апробированы разные комбинации обучающих выборок с классами объектов: усыхающие хвойные леса, хвойные леса, мелколиственные леса, территории непокрытые лесом (дороги, рубки, гари, открытые почвы, каменистые поверхности и т. п.), разреженный хвойный лес (преимущественно сосновый), смешанный преимущественно мелколиственный лес, включая ёрник (берёза кустарниковая).

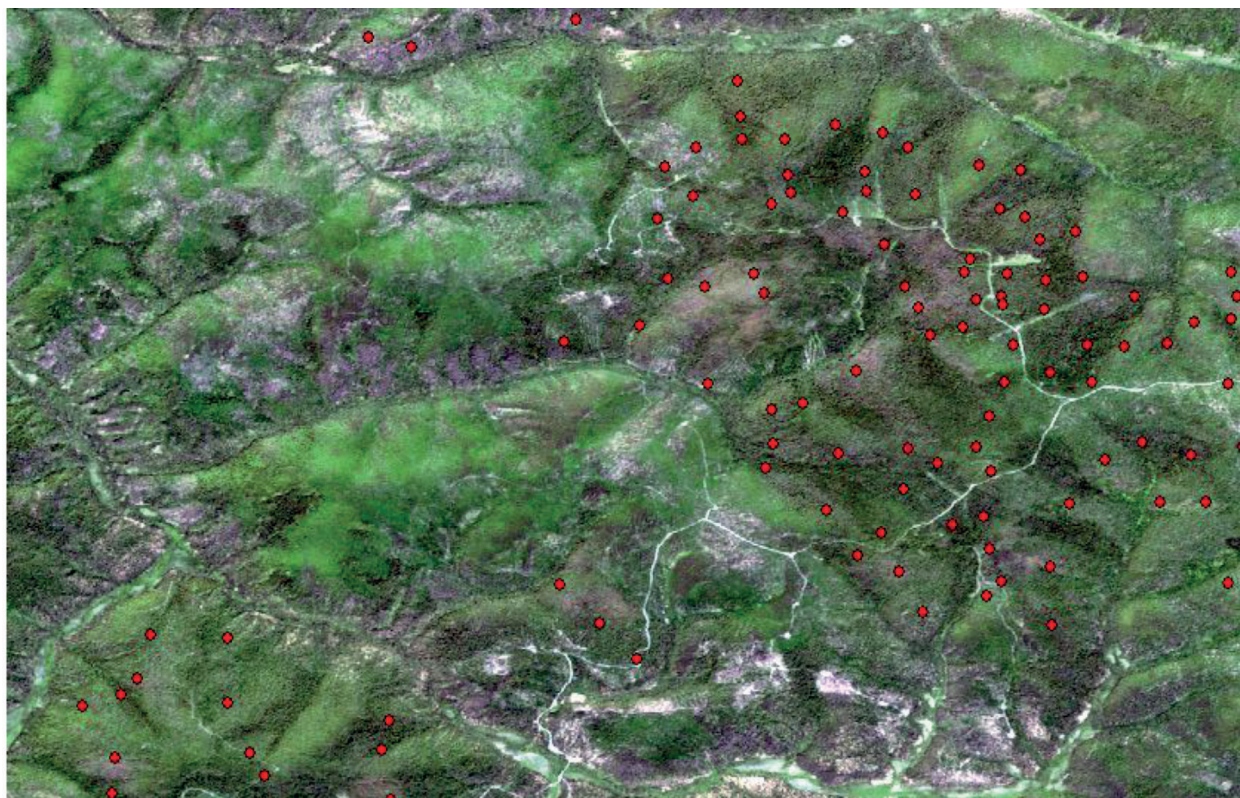


Рис. 2. Расположение пробных площадок (красные точки) лесопатологических обследований на тестовом участке, наложенных на снимок Sentinel-2 (2017)

Для проведения классификации космических снимков протестированы три алгоритма, реализованные в ArcGIS Pro: метод опорных векторов SVM (*англ.* Support Vector Machine), случайный лес RF (*англ.* Random Forest) и метод максимального правдоподобия MLC (*англ.* Maximum Likelihood Classification). Сравнительная оценка точности методов представлена в разд. Результаты. Примеры результатов классификации методом максимального правдоподобия представлены на рис. 3 (см. с. 267).

Оценка достоверности классификации основывалась на сопоставлении полученных классов с эталонными классами контрольной выборки и определении доли (в %) пикселей, верно отнесённых к классу, заданному как эталон, на основе вычисления матриц ошибок классификации. Контрольная выборка создана с помощью инструмента «создание точек оценки точности» в ArcGIS Pro (<https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/create-accuracy-assessment-points.htm>). Для класса усыхающие хвойные леса в качестве достоверного источника данных использовались точки лесопатологических обследований, которые не применялись при создании обучающих эталонов. Для остальных классов лесов в качестве достоверного источника в виде тематической карты использовался векторный слой лесоустроительных материалов (государственной инвентаризации лесов). Из полученных точек исключены точки, попавшие в рубки, гари, дороги, которые не отображены в лесоустроительных материалах ввиду их давности. Исключённые точки переведены в класс терри-

тории непокрытые лесом. К данному классу также отнесены точки, относящиеся к нелесным территориям, на основе визуального дешифрирования снимков World View ESRI, Яндекс Карты и др. На основе сравнения эталонных и классифицированных значений рассчитаны матрицы ошибок (*англ.* error matrix) и следующие показатели:

- общая точность классификации, отражающая долю правильно классифицированных пикселей от общего числа проверенных;
- точность пользователя для каждого класса, отражающая долю пикселей, правильно отнесённых классификацией к определённому классу согласно контрольной выборке от общего количества проверяемых пикселей в данном классе;
- точность производителя, характеризующая долю пикселей эталонного класса, которые были правильно отнесены к этому же классу в результатах классификации (Чандра, Гош, 2008; Congalton, Green, 2008).

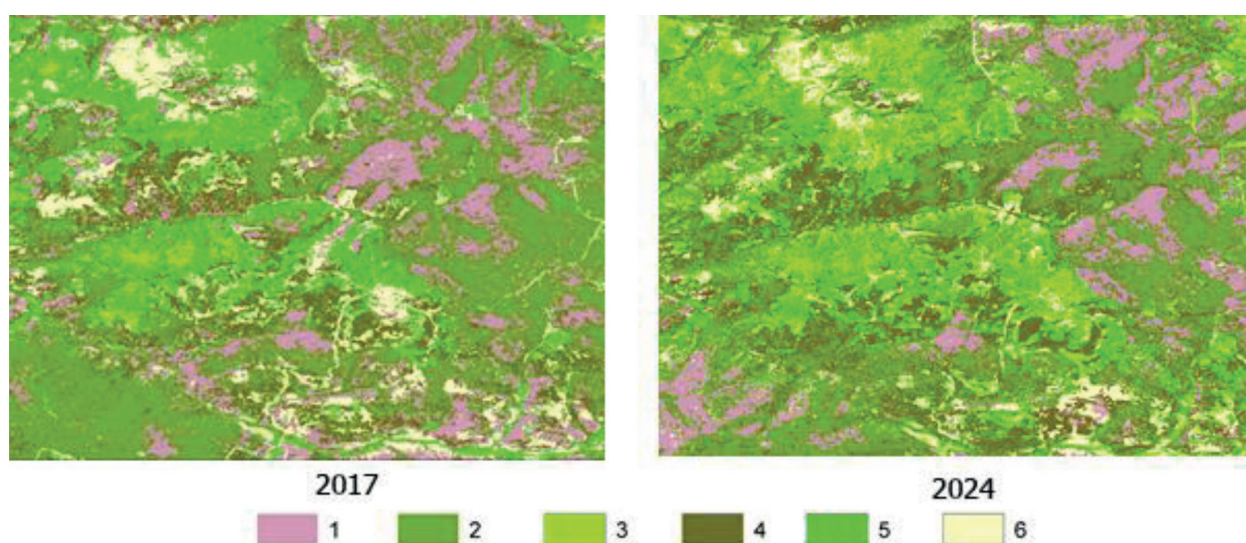


Рис. 3. Результаты классификации фрагмента космических снимков Sentinel-2: 1 — усыхающие хвойные леса; 2 — хвойные леса без признаков усыхания; 3 — мелколиственные леса; 4 — разреженный хвойный лес (преимущественно сосновый); 5 — смешанный преимущественно мелколиственный лес; 6 — территории непокрытые лесом (дороги, рубки, гари, каменистые поверхности и т. п.)

Следующим этапом проведена оценка пространственно-временных трендов изменения наземной биомассы в районе хребта Хамар-Дабан (в границах Бабушкинского лесничества и Байкальского заповедника) на основе глобальных спутниковых данных Biomass CCI за период с 2015 по 2022 г. с помощью модуля Polynomial Trend from Grids в программном обеспечении SAGA (*англ.* System for Automated Geoscientific Analyses) GIS (https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.3.0/statistics_regression_9.html). Данный модуль применяет временной регрессионный анализ к последовательности из растровых данных для определения тренда изменений для каждого пикселя. При анализе спутниковых данных Biomass CCI алгоритм модуля для каждого пикселя изучаемой территории строит линейную регрессионную модель, где независимой переменной представляется время (год), а зависимой — значение биомассы. В результате проведённого анализа инструмент создаёт два типа выходных растров:

- коэффициент детерминации R^2 , показывающий, насколько точно модель описывает фактическое распределение данных относительно линии тренда (значения $R^2 > 0,5$ соответствуют участкам с устойчивым линейным трендом);
- наклон линии регрессии Slope, который характеризует среднегодовую величину изменения наземной биомассы, выраженную в тоннах на гектар в год ($\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), т. е. направление и интенсивность изменения запасов с 2015 по 2022 г.: отрицательные значения указывают на её снижение, положительные — на увеличение.

Следует отметить, что данные Biomass CCI доступны до 2022 г. включительно, поэтому анализ трендов выполнен за период 2015–2022 гг. Сопоставление с результатами классификации 2024 г. основано на предположении, что выявленные тренды сохраняют свою направленность вплоть до момента съёмки. Это допущение является методологическим ограничением, которое следует учитывать при интерпретации результатов.

Результаты

Сравнительный анализ точности трёх методов классификации (*табл. 1*) показал, что все три алгоритма демонстрируют удовлетворительные результаты для выделения усыхающих хвойных лесов. Метод максимального правдоподобия обеспечивает наиболее высокую надёжность выделения усыхающих древостоев в 2024 г. (точность пользователя 0,93), что становится приоритетом для задач выявления усыхающих хвойных лесов. Общая точность MLC (0,72) незначительно уступает случайному лесу — 0,73. Точность производителя (0,60–0,67) указывает на то, что часть усыхающих древостоев попадает в другие классы, например в классы хвойные леса без признаков усыхания и разреженный хвойный лес. Это, вероятно, связано со слабой степенью усыхания на части пробных площадей и близкими спектральными характеристиками этих классов.

Таблица 1. Показатели точности классификаций для класса усыхающие хвойные леса

Год	Метод	Точность пользователя	Точность производителя	Общая точность
2017	MLC	0,68	0,50	0,64
	RF	0,76	0,66	0,75
	SVM	0,75	0,63	0,71
2024	MLC	0,93	0,60	0,72
	RF	0,79	0,67	0,73
	SVM	0,82	0,60	0,68

Апробация методов также показала, что метод опорных векторов требует значительно больших вычислительных ресурсов и времени обработки данных, чем метод максимального правдоподобия и случайного леса при классификации тестового участка космических снимков Sentinel-2. Высокие требования к вычислительным ресурсам для метода опорных векторов отмечаются и в литературе (Adugna et al., 2022; Huang et al., 2002).

Важным фактором при выборе метода стало поведение алгоритмов в условиях ограниченного объёма обучающих данных. На начальном этапе формирования обучающих выборок (60 эталонов) метод максимального правдоподобия показал более высокие показатели по сравнению со случайным лесом: MLC — точность пользователя 0,8, общая точность 0,7, точность производителя 0,4; RF — точность пользователя 0,8, общая точность 0,44, точность производителя 0,13. Увеличение объёма обучающих выборок до финальных значений (более 200 эталонов) позволило повысить показатели всех методов, однако потребовало значительных временных затрат на сбор и верификацию эталонов. В отличие от RF, MLC показал более высокие показатели точности уже при ограниченном объёме обучающих данных, что делает его предпочтительным для практического применения в условиях, где сбор большого объёма эталонных данных затруднён или экономически нецелесообразен.

Матрицы ошибок классификации методом максимального правдоподобия представлены в *табл. 2, 3*.

В границах тестового участка (7124 га) площадь усыхания хвойных лесов составила 1469 га в 2017 г. и 917 га в 2024 г. Площадь усыхания сократилась на данном участке на 552 га. Площадь мелколиственных лесов увеличилась с 510 га в 2017 г. до 630 га в 2024 г. за счёт восстановления лесов на рубках и гарях.

Таблица 2. Матрица ошибок классификации снимка 2017 г.

Классы классификации	Эталонные						Всего	Точность пользователя	Коэффициент Каппа
	1	2	3	4	5	6			
1	19	3	0	5	0	1	28	0,70	0
2	13	16	0	0	0	0	29	0,60	0
3	0	0	13	0	0	0	13	1,00	0
4	0	0	0	3	0	1	4	0,75	0
5	4	7	1	0	12	0	24	0,50	0
6	2	0	0	1	0	5	8	0,63	0
Всего	38	26	14	9	12	7	106	0	0
Точность производителя	0,50	0,60	0,90	0,33	1,00	0,70	0	0,64	0
Коэффициент Каппа	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55

Таблица 3. Матрица ошибок классификации снимка 2024 г.

Классы классификации	Эталонные						Всего	Точность пользователя	Коэффициент Каппа
	1	2	3	4	5	6			
1	27	2	0	0	0	0	29	0,93	0
2	12	23	0	3	1	0	39	0,60	0
3	1	0	11	0	1	0	13	0,84	0
4	1	0	0	5	0	0	6	0,83	0
5	2	5	2	1	14	0	24	0,58	0
6	2	0	0	1	0	6	9	0,66	0
Всего	45	30	13	10	16	6	120	0	0
Точность производителя	0,60	0,80	0,80	0,50	0,90	1,00	0	0,72	0
Коэффициент Каппа	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64

На основе временного регрессионного анализа спутниковых данных Biomass CCI проведена количественная оценка среднегодового изменения биомассы с 2015 по 2022 г. Сравнительный анализ пространственного распределения выявленных трендов биомассы на тестовом участке показал, что зоны снижения биомассы соответствуют участкам усыхания хвойных лесов, выделенным по результатам автоматизированной классификации данных ДЗЗ (рис. 4, см. с. 270). Резкое снижение биомассы (до -27 Мг/га) связано с лесными пожарами и рубками. При этом сопоставление выполнено для трендов биомассы за период 2015–2022 гг. и классификации 2024 г., что предполагает устойчивость выявленных трендов вплоть до момента съёмки.

Для зон, затронутых усыханием, коэффициент детерминации R^2 варьировал от 0,5 до 0,9, что свидетельствует о преобладании устойчивого линейного тренда в снижении надземной биомассы и позволяет рассматривать полученные значения наклона Slope как статистически надёжные (рис. 5, см. с. 270).

Для количественной оценки связи между результатами классификации и трендами изменения биомассы рассчитана зональная статистика в среде ArcGIS Pro (табл. 4). Данный инструмент позволяет вычислить статистические характеристики значений одного раstra (в данном случае — наклона регрессии Slope) в пределах зон, заданных другим растром или векторным слоем (<https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/3.5/tool-reference/image-analyst/zonal-statistics-as-table.htm>). В качестве зонального раstra выступала карта классификации, в качестве входного раstra значений — слой наклона регрессии Slope.

Полученные результаты подтверждают эффективность использования комплексного подхода с применением нескольких источников спутниковой информации для мониторинга усыхания хвойных лесов.

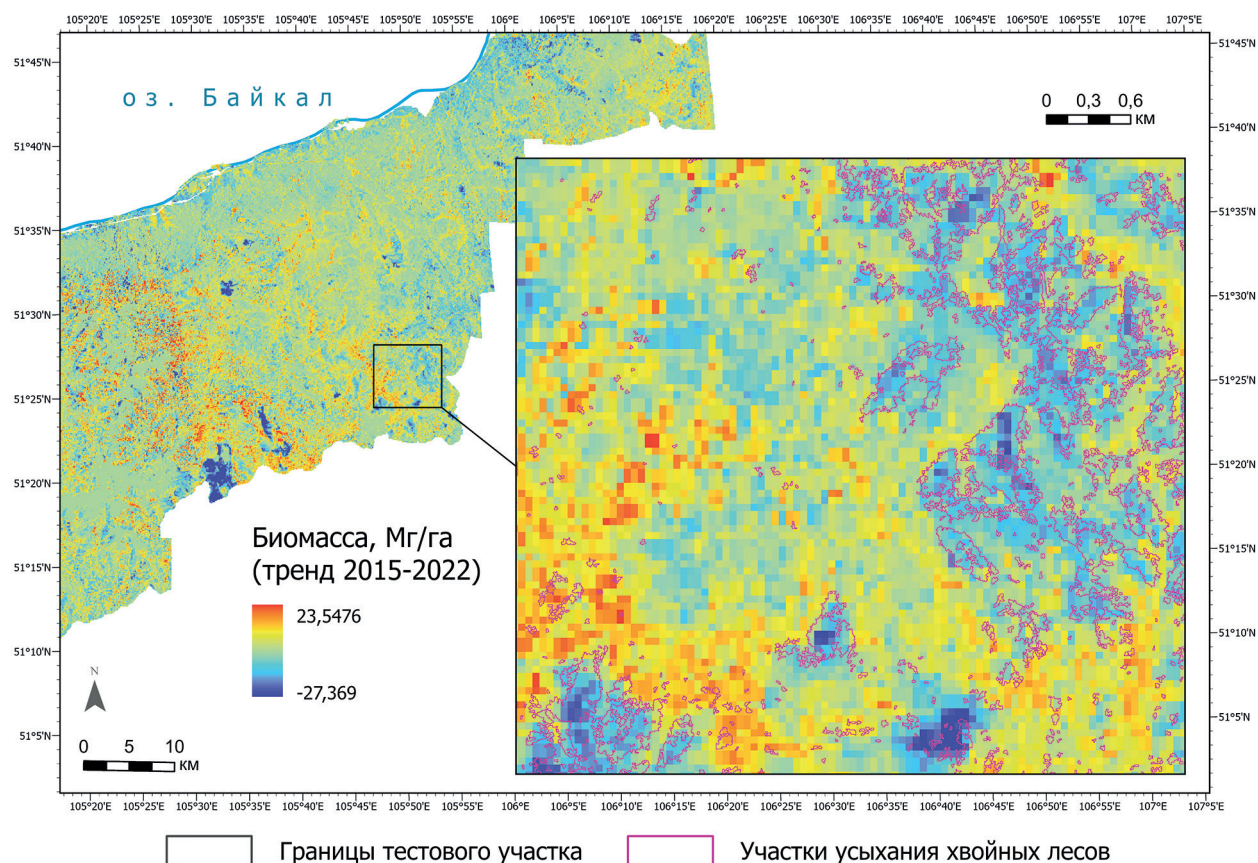


Рис. 4. Фрагмент карты трендов изменения надземной биомассы на территорию исследования по данным Biomass CCI за 2015–2022 гг. (на врезке отображён тестовый участок с наложением векторного слоя усыхания хвойных за 2024 г.)

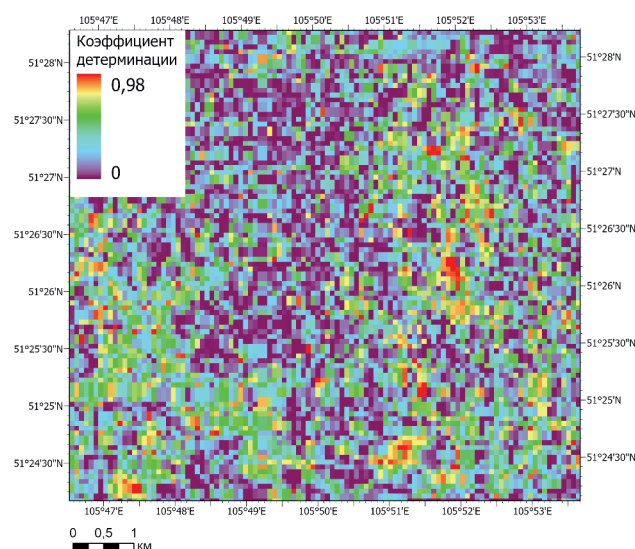


Рис. 5. Фрагмент карты коэффициента детерминации R^2 для тестового участка по данным Biomass CCI за 2015–2022 гг.

Анализ зональной статистики (табл. 4) показывает, что для класса усыхающие хвойные леса значения наклона регрессии варьируют от $-11,22$ до $9,42 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. В 2017 г. среднее значение составило $+0,50 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ при медиане $+0,78 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, что указывает на преобладание положительного тренда. В 2024 г. среднее значение снизилось до $-1,23 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$

при медиане $-1,39 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Медиана ниже среднего свидетельствует о том, что более половины площади класса характеризуется интенсивностью снижения биомассы выше средней. Отрицательный знак показателей подтверждает устойчивый характер деградации. Смена знака тренда с положительного на отрицательный может указывать на активизацию процессов усыхания в период между 2017 и 2024 гг.

Таблица 4. Зональная статистика значений наклона регрессии Slope по классам классификации для снимка

Класс	Год	Площадь, га	Минимум, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Максимум, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Среднее, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Медиана, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Стандартное отклонение
Усыхающие хвойные леса	2017	1469,4	-11,22	9,42	+0,50	+0,78	3,30
	2024	917,3	-11,22	8,34	-1,23	-1,39	3,11
Хвойные леса без признаков усыхания	2017	2227,5	-11,62	10,11	+0,78	+0,84	2,91
	2024	2403,3	-9,89	10,11	+1,47	+1,44	2,72
Мелколиственные леса	2017	510,4	-6,51	8,31	+1,21	+1,38	2,38
	2024	629,9	-7,64	8,35	+0,96	+0,97	2,39
Разреженный хвойный лес	2017	353,6	-12,62	8,15	+0,83	+1,28	3,33
	2024	503,7	-9,78	8,42	+0,53	+0,85	3,37
Смешанные леса	2017	2044,2	-9,31	9,42	+0,89	+1,09	2,91
	2024	2293,0	-9,56	9,08	+1,02	+1,20	2,81
Территории, непокрытые лесом	2017	490,2	-9,72	9,46	+0,98	+0,98	2,61
	2024	348,1	-12,62	9,46	+0,21	+0,51	3,12

Заключение

Разработанная методика дополняет существующие методы картографирования усыхания лесов на основе автоматизированного дешифрирования данных ДЗЗ за счёт интеграции с данными о потерях биомассы (Biomass CCI). Данная методика позволяет проводить картографирование усыхания хвойных лесов, а также количественно оценивать связанные с этим процессом потери наземной биомассы, что важно для расчёта углеродного баланса и прогнозирования последствий для экосистемы.

Вместе с тем выявлены ограничения метода в дешифрировании зон со слабым и средним усыханием, что требует дальнейшего совершенствования алгоритмов классификации и расширения базы обучающих данных. Кроме того, временное несоответствие между данными Biomass CCI (2015–2022) и классификацией 2024 г. требует осторожной интерпретации при экстраполяции трендов на более поздний период.

Практическая значимость исследования заключается в возможности оперативной оценки площади и динамики усыхания хвойных лесов, а также внедрения предложенной методики в государственную систему лесопатологического мониторинга. Предложенная методика не требует организации специальных полевых работ для каждого нового снимка. Наземные лесопатологические обследования в рамках государственного лесопатологического мониторинга проводятся на регулярной основе по единой методике, с использованием унифицированных критериев оценки состояния насаждений и стандартизированной закладки пробных площадей. Особенно это актуально для территорий с уже выявленными очагами усыхания, где наблюдение за динамикой процесса ведётся постоянно. Данные существующих лесопатологических обследований могут быть использованы на этапе калибровки для формирования эталонных спектральных образов классов, что позволяет в дальнейшем применять обученный классификатор на сходных по ландшафтным условиям территориях с минимальной адаптацией. Полученные результаты классификации могут в свою очередь дополнительно верифицироваться новыми полевыми данными по мере их поступления. Таким образом,

предложенный подход демонстрирует, что данные полевых лесопатологических обследований могут эффективно применяться в дистанционном мониторинге усыхания хвойных лесов на больших территориях, где проведение полевых работ затруднено или экономически нецелесообразно.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением географического охвата и более глубоким изучением биотических и абиотических факторов, влияющих на динамику усыхания.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Литература

1. Алексеев В. С., Черниковский Д. М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Изв. вузов. Лесной журн. 2024. № 2. С. 11–28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28
2. Белова Н. А., Морозова Т. И. Динамика состояния кедровых древостоев Байкальского заповедника и сопредельных территорий // Материалы конф. «Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике». Красноярск: ИЛ СО РАН, 2016. С. 27–28.
3. Белова Н. А., Морозова Т. И. Динамика лесопатологического состояния пихтовых древостоев Байкальского заповедника (1983–2015) // Лесной вестн. 2018. Т. 22. № 2. С. 5–15. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-5-15
4. Воронин В. И., Карбаинов Ю. М., Моложников В. М., Соков М. К. Влияние техногенеза на деструкцию высокогорных пихтовников Хамар-Дабана // Экологическая роль горных лесов. Улан-Удэ, 1986. С. 82–84.
5. Воронин В. И., Софронов А. П., Морозова Т. И. и др. Ландшафтная приуроченность бактериальных болезней темнохвойных лесов хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // География и природные ресурсы. 2019. № 4(158). С. 56–65. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56–65).
6. Воронин В. И., Софронов А. П., Морозова Т. И., Осолков В. А., Суховольский В. Г., Ковалев А. В. Природные риски уязвимости темнохвойной тайги Южного Прибайкалья (хребет Хамар-Дабан) // Современные проблемы лесозащиты и пути их решения: материалы 2-й Международ. научно-практич. конф. Минск: БГТУ, 2020. С. 73–78.
7. Девятова Н. В., Ершов Д. В., Лямцев Н. И., Денисов Б. С. Определение масштабов усыхания хвойных лесов Европейского Севера России по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 204–211.
8. Зиганшин Р. А., Карбаинов Ю. М., Киселев В. В., Моложников В. Н., Овчинникова Т. М., Воронин В. И. Пространственное распределение усыхающих темнохвойных насаждений Хамар-Дабана // Экологическая роль горных лесов: тез. докл. Всесоюзной конф. Бабушкин, 1986. С. 107–108.
9. Карбаинов Ю. М. Лесотипологические особенности усыхающих пихтовых лесов центрального Хамар-Дабана: тез. докл. // Вклад молодых биологов Сибири в решении вопроса продовольственной программы и охраны окружающей среды. Улан-Удэ, 1984. С. 34.
10. Карбаинов Ю. М., Моложников В. Н. Усыхание темнохвойных лесов южного Прибайкалья // Усыхание горных темнохвойных лесов южного и юго-восточного побережий озера Байкал. Иркутск, 1983. С. 11–20.
11. Катковский Л. В., Силук О. О., Беляев Б. И. и др. Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 88–102. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
12. Князева С. В., Королева Н. В., Эйшлина С. П., Сочилова Е. Н. Оценка состояния растительности в очаге массового размножения сибирского шелкопряда по спутниковым данным // Лесоведение. 2019. № 5. С. 385–398. DOI: 10.1134/S0024114819050036.
13. Морозова Т. И., Осолкова Т. А., Плешанов А. С. Состояние пихтовых лесов Хамар-Дабана в зоне влияния атмосферных выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Сибирский эколог. журн. 2005. № 4. С. 701–706.
14. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Бурятия за 2024 год. Улан-Удэ, 2025. 406 с.
15. Рожков А. А., Козак В. Т. Устойчивость лесов. М.: Агропромиздат, 1989. 239 с.
16. Ставников Д. Ю. Факторы деструкции темнохвойной тайги Хамар-Дабана (Южное Прибайкалье): дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2013. 115 с.

17. Харук В. И., Им С. Т., Рэнсон К. Дж., Сан Г. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 6. С. 46–55.
18. Харук В. И., Им С. Т., Петров И. А., Ягунов М. Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сибирский эколог. журн. 2016. № 5. С. 750–760. DOI: 10.15372/SEJ20160512.
19. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
20. Черпаков В. В. Бактериальная водянка в темнохвойных лесах Хамар-Дабана (Южное Прибайкалье) // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 55. С. 110–116.
21. Aduana T., Xu W., Fan J. Comparison of random forest and support vector machine classifiers for regional land cover mapping using coarse resolution FY-3C images // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 3. Article 574. DOI: 10.3390/rs14030574.
22. Congalton R. G., Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 200 p. DOI: 10.1201/9781420055139.
23. Gao Y., Skutsch M., Paneque-Gálvez J., Ghilardi A. Remote sensing of forest degradation: a review // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. Article 103001. DOI: 10.1088/1748-9326/abaad7.
24. Hart S. J., Veblen T. T. Detection of spruce beetle-induced tree mortality using high- and medium-resolution remotely sensed imagery // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 168. P. 134–145. DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.015.
25. Huang C., Davis L. S., Townshend J. R. G. An assessment of support vector machines for land cover classification // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. No. 4. P. 725–749. DOI: 10.1080/01431160110040323.
26. Kennedy R. E., Yang Z., Cohen W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. Iss. 12. P. 2897–2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
27. Potočník Buhvald A., Oštir K., Skudník M. Detecting bark beetle-induced changes in coniferous alpine forests using Sentinel-2 time series and in-situ felling data // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. V. XLVIII-M-7-2025. P. 283–289. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-7-2025-283-2025.

Mapping coniferous forest dieback using Earth remote sensing data: A case study of Khamar-Daban ridge forests

M. V. Tsydyпова

*National Research University Higher School of Economics, Moscow 109028, Russia
E-mail: ecovie@mail.ru*

The article presents a methodology for mapping coniferous forest decline, based on the integration of automated remote sensing data interpretation techniques, vegetation indices, remote sensing data on above-ground biomass (Biomass CCI (Climate Change Initiative)), and materials from ground-based forest pathology surveys using forests of the Khamar-Daban ridge (Republic of Buryatia) as a case study. The relevance of the research is determined by the spread of dark coniferous forest decline in the study area and the need for effective monitoring of their condition and the dynamics of degradation processes. Multispectral Sentinel-2 satellite imagery was used as source data. A machine learning classification method based on training samples defined from ground data was used for automated detection of decline areas. An assessment of the areas of coniferous forest decline from 2017 to 2024 was conducted in the study area. On the basis of global Biomass CCI data from 2015–2022, an analysis of spatiotemporal trends was performed, revealing a correspondence between areas of biomass decrease and foci of forest decline in the test area. The presented integrated approach enhances the accuracy and informativeness of monitoring coniferous forest decline and can be integrated into forest pathology control systems.

Keywords: coniferous forest decline, remote sensing, automated classification methods, Biomass CCI aboveground biomass data

Accepted: 14.04.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-263-275

References

1. Alekseev V.S., Chernikhovskiy D.M., Identification of damage to coniferous stands based on comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveys, *Bull. Higher Education Institute. Lesnoi Zhurnal*, 2024, No. 2, pp. 11–28 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.
2. Belova N.A., Morozova T.I., Dynamics of stone pine stands health at Baikal Reserve and adjacent territories, *Materialy konferentsii "Monitoring i biologicheskie metody kontrolya vrediteli i patogenov drevesnykh rastenii: ot teorii i praktike"* (Proc. Conf. "Monitoring and biological control methods of pests and pathogens of woody plants: from theory to practice"), Krasnoyarsk: SIF SB RAS, 2016, pp. 27–28 (in Russian).
3. Belova N.A., Morozova T.I., Dynamics of the forest pathology condition of fir stands of the Baikal Nature Reserve (1983–2015), *Forestry Bull.*, 2018, V. 22, No. 2, pp. 5–15 (in Russian), DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-5-15.
4. Voronin V.I., Karbainov Yu. M., Molozhnikov V.M., Sokov M. K., Influence of technogenesis on the destruction of high-mountain fir forests of Khamar-Daban, In: *Ekologicheskaya rol' gornyykh lesov* (Ecological role of mountain forests), Ulan-Ude, 1986, pp. 82–84 (in Russian).
5. Voronin V.I., Sofronov A. P., Morozova T.I. et al., The landscape-specific occurrence of bacterial diseases in dark-coniferous forests on Khamar-Daban ridge (Southern Baikal region), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2019, No. 4(158), pp. 56–65 (in Russian), DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65).
6. Voronin V.I., Sofronov A. P., Morozova T.I., Oskolkov V.A., Sukhovol'skii V.G., Kovalev A.V., Natural risks of vulnerability of the dark coniferous taiga in Southern Cisbaikalia (Khamar-Daban range), *Sovremennye problemy lesozashchity i puti ikh resheniya: materialy 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Modern Problems of Forest Protection and Ways of Their Solution: Materials of the 2nd Intern. Research-to-Practice Conf.), Minsk: BSTU, 2020, pp. 73–78 (in Russian).
7. Devaytova N. V., Ershov D. V., Lyamtsev N. I., Denisov B. S., Determining the scale of drying of coniferous forests in the European North of Russia according to satellite observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Iss. 4, V. 2, pp. 204–211 (in Russian).
8. Ziganshin R.A., Karbainov Yu. M., Kiselev V.V. Molozhnikov V.N., Ovchinnikova T.M., Voronin V.I. et al., Spatial distribution of dying dark coniferous stands of Khamar-Daban, *Ehkolgicheskaya rol' gornyykh lesov: tezisy dokladov Vsesoyuznoi konferentsii* (Ecological Role of Mountain Forests: Abstracts All-Union Conf.), Babushkin, 1986, pp. 107–108 (in Russian).
9. Karbainov Yu. M., Forest typological features of drying fir forests of the central Khamar-Daban, *Vklad molodykh biologov Sibiri v reshenii voprosa prodovol'stvennoi programmy i okhrany okruzhayushchei sredy: tezisy dokladov* (Contribution of young biologists of Siberia to solving the issue of the food program and environmental protection), Ulan-Ude, 1984, p. 34 (in Russian).
10. Karbainov Yu. M., Molozhnikov V.N., Drying of dark coniferous forests of the southern Baikal region, In: *Usykhaniye gornyykh temnokhvoinnykh lesov yuzhnogo i yugo-vostochnogo poberezh'ya ozera Baikal* (Drying of mountain dark coniferous forests of the southern and southeastern coasts of Lake Baikal), Irkutsk, 1983, pp. 11–20 (in Russian).
11. Katkovsky L. V., Silyuk O.O., Belyaev B.I. et al., Detection of drying coniferous forests from aerospace data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 88–102 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
12. Knyazeva S.V., Koroleva N. V., Eidlina S. P., Sochilova E.N., Health of vegetation in the area of mass outbreaks of Siberian moth based on satellite data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, V. 12, No. 7, pp. 743–752, DOI: 10.1134/S1995425519070114.
13. Morozova T.I., Oskolkova T.A., Pleshanov A.S., The state of fir forests of the Khamar-Daban in the zone of influence of atmospheric discharges of the Baikal Pulp and Paper Mill, *Sibirskii ehkologicheskii zhurnal*, 2005, No. 4, pp. 701–706 (in Russian).
14. *Obzor sanitarnogo i lesopatologicheskogo sostoyaniya lesov Respubliki Buryatiya za 2024 god* (Review of the sanitary and forest pathological condition of the forests of the Republic of Buryatia for 2024), Ulan-Ude, 2025, 406 p. (in Russian).
15. Rozhkov A.A., Kozak V.T., *Ustoichivost' lesov* (Forest stability), Moscow: Agropromizdat, 1989, 239 p. (in Russian).
16. Stavnikov D. Yu., *Faktory destrukttsii temnokhvoinoi taigi Khamar-Dabana (Yuzhnoe Pribaikal'e): Dis. ... kand. biol. nauk* (Factors of destruction of the dark coniferous taiga of Khamar-Daban (Southern Baikal region), Cand. biol. sci. thesis), Irkutsk, 2013, 115 p. (in Russian).
17. Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Sun G., High-resolution satellite images in the forest-tundra ecotone dynamics analysis, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 6, pp. 46–55 (in Russian).
18. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Yagunov M.N., Dark needle conifer stands decline in Baikal region, *Sibirskii ehkologicheskii zhurnal*, 2016, No. 5, pp. 750–760 (in Russian), DOI: 10.15372/SEJ20160512.

19. Chandra A. M., Ghosh S. K., *Remote Sensing and Geographical Information System*, Alpha Science, 2006, 298 p.
20. Cherpakov V. V., Bacterial dropsy in dark coniferous forests of Khamar-Daban (Southern Baikal region), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2019, No. 55, pp. 110–116 (in Russian).
21. Adugna T., Xu W., Fan J., Comparison of random forest and support vector machine classifiers for regional land cover mapping using coarse resolution FY-3C images, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 3, Article 574, DOI: 10.3390/rs14030574.
22. Congalton R. G., Green K., *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2008, 200 p., DOI: 10.1201/9781420055139.
23. Gao Y., Skutsch M., Paneque-Gálvez J., Ghilardi A., Remote sensing of forest degradation: a review, *Environmental Research Letters*, 2020, V. 15, Article 103001, DOI: 10.1088/1748-9326/abaad7.
24. Hart S. J., Veblen T. T., Detection of spruce beetle-induced tree mortality using high- and medium-resolution remotely sensed imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2015, V. 168, pp. 134–145, DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.015.
25. Huang C., Davis L. S., Townshend J. R. G., An assessment of support vector machines for land cover classification, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, V. 23, No. 4, pp. 725–749, DOI: 10.1080/01431160110040323.
26. Kennedy R. E., Yang Z., Cohen W. B., Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2010, V. 114, Iss. 12, pp. 2897–2910, DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
27. Potočník Buhvald A., Oštir K., Skudnik M., Detecting bark beetle-induced changes in coniferous alpine forests using Sentinel-2 time series and in-situ felling data, *The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2025, V. XLVIII-M-7-2025, pp. 283–289, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-7-2025-283-2025.