



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



Е. И. Пономарев, В. И. Харук, Е. Г. Швецов

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ  
В СИБИРИ: ДИНАМИКА ГОРИМОСТИ  
В СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ,  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ  
ЗАКОНОМЕРНОСТИ,  
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОГНОЗЫ

УДК 614.841.42-047.36(571.1/5)

ББК 43.488

П563

**Р е ц е н з е н т ы:**

П. А. Цветков, доктор биологических наук, заведующий лабораторией лесной пирологии ИЛ СО РАН;

В. А. Иванов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства СибГАУ;

С. В. Верховец, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории лесной пирологии ИЛ СО РАН

**Пономарев, Е. И.**

П563

Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы : монография / Е. И. Пономарев, В. И. Харук, Е. Г. Швецов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 220 с.

ISBN 978-5-7638-4111-4

Обобщены результаты более чем 20-летнего периода наблюдений за пожарами на территории Сибири спутниковыми средствами. Представлены методы сбора, обработки и калибровки данных о пожарах, получаемых дистанционно, геопространственный анализ горимости лесов Сибири, технология оценки энергетических характеристик активных зон пожаров, многолетние данные и тренды прямых пожарных эмиссий углерода, а также прогностические сценарии пожароопасных сезонов и динамики пожарных режимов в условиях наблюдаемых климатических изменений.

Предназначена широкому кругу ученых и специалистов в области глобальных изменений биосферы и климата, экологии, мониторинга состояния природных ресурсов и окружающей среды, охраны лесов от пожаров, геоинформатики, математического моделирования природных процессов, а также преподавателям, аспирантам и студентам биологического, экологического и лесохозяйственного направлений.

*Рекомендована к изданию ученым советом Института экологии и географии Сибирского федерального университета и ученым советом Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»*

**Электронный вариант издания см.:**  
**<http://catalog.sfu-kras.ru>**

**УДК 614.841.42-047.36(571.1/5)**  
**ББК 43.488**

ISBN 978-5-7638-4111-4

© Сибирский федеральный университет, 2019

---

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
Г л а в а 1. ДИСТАНЦИОННЫЕ ДАННЫЕ В МОНИТОРИНГЕ ПОЖАРОВ В СИБИРИ НА РУБЕЖЕ КОНЦА XX – начала XXI века.....	12
1.1. Развитие системы спутникового мониторинга.....	12
1.2. Зона ответственности системы спутникового мониторинга.....	17
1.3. Характеристики пожаров в базе данных.....	21
Г л а в а 2. ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ.....	37
2.1. Вероятностный алгоритм обнаружения пожаров.....	37
2.2. Детектирование активной зоны пожара.....	52
2.3. Обработка результатов детектирования пожаров.....	63
2.4. Геометрическое преобразование полигонов пожаров.....	68
2.5. Валидация данных о площадях пожаров.....	69
Г л а в а 3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ГОРИМОСТЬ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ.....	76
3.1. Лиственничные леса Сибири.....	76
3.2. Район исследований и данных о пожарах.....	78
3.3. Пространственно-временные закономерности горимости лиственничников Сибири.....	81
Г л а в а 4. ДИНАМИКА И ТРЕНДЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ И ГОРИМОСТЬ ЛЕСОВ СИБИРИ.....	89
4.1. Пожары в меняющемся климате.....	89
4.2. Регион и исходные данные о пожарах.....	90
4.3. Тренды метеорологических показателей.....	93
4.4. Связь метеорологических показателей и горимости.....	98

Г л а в а 5. ПОЖАРЫ В АЛТАЕ-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ: ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИУРОЧЕННОСТЬ.....	104
5.1. Особенности пожарных режимов в Алтай-Саянском регионе .....	104
5.2. Характеристика Алтай-Саянского региона .....	106
5.3. Характеристика горимости региона .....	109
5.4. Нелесные пожары АСР и юга Сибири.....	119
 Г л а в а 6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖАРОВ В ЛЕСАХ СИБИРИ И МЕТОДЫ ИХ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ .....	126
6.1. Дистанционная регистрация мощности теплоизлучения.....	126
6.2. Оценка степени нарушенности растительности.....	134
6.3. Критерии классификации пожара экстремальной интенсивности .....	137
6.4. Учет интенсивности при оценке пожарных эмиссий ....	143
6.5. Прямые пожарные эмиссии в Сибири .....	148
 Г л а в а 7. ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРООПАСНОЙ ОБСТАНОВКИ В ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ СИБИРИ.....	159
7.1. Обусловленность динамики пожаров в Сибири.....	159
7.2. Анализ повторяемости пожаров в лесах Сибири .....	161
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	177
 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	179
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	182
 ПРИЛОЖЕНИЕ .....	199

---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей монографии «Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы» авторы обобщили результаты более чем 20-летнего периода инструментальных наблюдений пожаров на территории Сибири. В основе лежит информация, полученная при тематической обработке данных спутниковых съемок NOAA/AVHRR за период 1995–2007 гг. и Terra/MODIS – 2007–2018 гг. Многолетние сведения о параметрах пожаров были представлены в формате геоинформационного банка данных. Весь комплекс работ выполнен в Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленном подразделении Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН».

В работе представлены результаты обработки спутниковой информации и подходы к тематической интерпретации полученных данных. Анализируются следующие аспекты проблемы.

В главе 1 обсуждаются результаты мониторинга пожаров в Сибири спутниковыми средствами, проводимого в Институте леса СО РАН более 20 лет. Показаны структура и наполнение базы данных пожаров в формате векторных полигональных покрытий. Обсуждается классификация пожаров по площадям, в том числе сделан акцент на доли экстремально больших пожаров в общей статистике горимости лесов.

В главе 2 представлены методы обработки и калибровки данных о пожарах, получаемых дистанционно; в частности, обсуждаются разработанные методы геоинформационного анализа и преобразования полигонов пожаров, а также регистрируемых площадей пожаров. Количественно показано, что применение разработанного подхода позволяет на 29–42 % снижать число ошибок при оценке площадей пожаров на современном этапе технологического обеспечения процесса.

В главе 3 приведены результаты анализа горимости лиственничников Центральной Сибири, выполненного на основе данных спутникового мониторинга пожаров и материалов наземных обследований. Дано количественное описание тренда возрастания частоты и площадей пожаров, показана значимая корреляционная связь горимости, длительности пожароопасного сезона и величины межпожарных интервалов с широтным градиентом инсоляции.

В главе 4 многолетняя динамика горимости лесов Сибири рассмотрена в ключе наблюдаемых климатических изменений. Для этого дополнительно восстановлен более чем 100-летний ряд значений температурных аномалий и аномалий индекса засушливости (SPEI) для территории Сибири и отдельных регионов. Даны оценки скорости изменения температуры и SPEI за последние 20 лет в сравнении с 90-летним периодом (1901–1990). Показана значимая корреляционная связь динамики частоты пожаров и горимости лесов Сибири с метеорологическими аномалиями.

В главе 5 обсуждаются закономерности распределения природных пожаров, в том числе лесных и нелесных, в Алтае-Саянском регионе с привязкой к границам ландшафтных категорий, природным зонам, высотным поясам и формам профиля рельефа. Результаты позволили актуализировать современное состояние вопроса о горимости региона, основываясь на данных о пожарах с высокой степенью информационно-атрибутивного наполнения.

В главе 6 описаны результаты адаптации методик дистанционной оценки мощности теплоизлучения от активной зоны горения применительно к мониторингу пожаров в лесах Сибири. Предложен подход к классификации пожаров по энергетическим характеристикам в различные моменты регистрации активной зоны горения. Разработан критерий оперативного детектирования пожаров экстремально высокой интенсивности и/или верховой стадии горения. Показано, что дистанционные оценки мощности теплоизлучения согласуются с результатами классификации степени пожарного воздействия на участки, пройденные огнем. Впервые инструментально зафиксирована доля лесных пожаров Сибири с экстремальными энергетическими параметрами на уровне  $5,5 \pm 1,2$  %. Показано, что суммарная площадь лесов, пройденных пожарами высокой интенсивности, включая верховые, составляет не менее 8,5 % от среднегодовой, а в отдельные годы (например, 2009, 2010, экстремальный сезон 2012 г.) – достигала значений 15–25 %.

В главе 7 проанализирована повторяемость пожаров в Сибири с использованием кластерной сети. Выявлены зоны, в которых регулярный дефицит влагообеспеченности формирует условия возникновения и повторения экстремальных пожарных режимов. На основе анализа метеорологической информации и восстановленных данных о ПВ-1 предложены четыре типа модельных сценариев динамики пожарной опасности с оценкой вероятности их реализации, периодичности повторения и соответствующего уровня горимости на уровне субрегионов Сибири.

Введение, главы 1, 7 написаны Е. И. Пономаревым, главы 3, 4 – Е. И. Пономаревым и В. И. Харуком, главы 5, 6 – Е. И. Пономаревым,

В. И. Харуком, Е. Г. Швецовым, глава 2 и раздел «Приложение» подготовлены Е. И. Пономаревым и Е. Г. Швецовым.

Авторы выражают благодарность коллегам из Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН: доктору сельскохозяйственных наук Э. Н. Валендику, доктору биологических наук Г. А. Ивановой, доктору сельскохозяйственных наук В. А. Иванову, доктору биологических наук Д. И. Назимовой, доктору биологических наук П. А. Цветкову, кандидату биологических наук М. Л. Двинской, кандидату биологических наук Т. В. Пономаревой, кандидату физико-математических наук К. Ю. Литвинцеву за ценные советы, консультации и помощь в анализе, обработке и подготовке материалов, а также студентам и магистрантам Сибирского федерального университета (СФУ) Ю. О. Усатой, А. С. Скоробогатовой, А. Ю. Захаровой, Н.Д. Якимову, которые внесли вклад в обработку данных.

Результаты, представленные в главах 3–5 настоящего издания, были получены при финансовой поддержке Российского научного фонда в 2014–2016 гг. (проект № 14-24-00112 «Воздействие изменений климата на ареал, породный состав, продуктивность, жизненное состояние и горимость горных лесов Алтае-Саянского региона»), исследования, представленные в главах 6–7, выполнены в 2017–2018 гг. при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-00432); РФФИ, правительства Красноярского края, Краевого фонда науки (2017–2018) – проект № 17-41-240475 «Разработка математической модели для количественной оценки эмиссии углерода при пожарах в лесах Сибири на основе дистанционных инструментальных измерений»; РФФИ в 2017–2019 – проект № 17-04-00589 «Радиометрический метод количественного анализа структурной организации почвы»; РФФИ, правительства Красноярского края, Краевого фонда науки в 2018–2019 – проект № 18-41-242003 «Моделирование и спутниковый мониторинг эффектов от тепловых аномалий подстилающей поверхности в сезонно-талом слое почв криолитозоны Сибири».

Обработка спутниковых данных и геопространственный анализ пожаров Сибири в 2009–2013 гг. выполнялись при поддержке научной программы NASA, the Land Cover Land Use Change (LCLUC) № 08-LCLUC08-2-0003.

В работе по теме использованы технические возможности приемных комплексов Центра коллективного пользования и Единого регионального центра ДЗ Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск), объединяющего комплексы приема и обработки спутниковой информации ФИЦ КНЦ СО РАН, МЧС и Сибирского федерального университета.

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Пожары растительности для России являются одной из наиболее опасных и распространенных чрезвычайных ситуаций. Только в азиатской части России ежегодно пожарам растительности подвергается территория от 5 до 17 млн га (Determining effects..., 2002; AVHRR-derived..., 2004; Влияние природных пожаров..., 2011). Нередко последствия от лесных и степных пожаров сопровождаются существенным экологическим и материальным ущербом. Так, например, в 2015 г. в Хакасии и Забайкалье произошли массовые лесные и степные пожары, в результате которых пострадали населенные пункты и инфраструктура, имелись человеческие жертвы.

Природные пожары, кроме прямого ущерба, заключающегося в повреждении или уничтожении лесов, хозяйственных объектов, жилых строений, могут косвенно стать источником еще более серьезных техногенных катастроф. Особо возросло понимание угрозы, которую несут в себе природные пожары для объектов такого рода, после ряда событий, происшедших в нашей стране и за рубежом (Нововоронежская АЭС, 2001 г.; ядерный комплекс Ханфорд, 2000 г.).

Природные пожары, в том числе в лесах Сибири, являются одним из значимых факторов, влияющих на процессы планетарного масштаба. Начиная с конца XX столетия в циркумбореальной зоне в целом отмечаются рост температуры, изменение режима выпадения осадков, увеличение длительности засушливых периодов. Климатические изменения способны сыграть роль природного триггера в целом ряде процессов, в том числе существенно повлиять на динамику горимости лесов, зоны лесостепи и степи. Так, на российские бореальные леса приходится около 25 % глобальной наземной биомассы и, возможно, еще больший процент глобальных наземных запасов углерода (Alexeyev, Birdsey, 1998). Тем не менее данных по поведению и последствиям пожаров в этих лесах очень немного, и они часто противоречивы. Последние исследования показывают, что воздействие пожаров в бореальных регионах на глобальный баланс углерода сильно недооценивается и что потенциально это воздействие будет претерпевать очень значительные изменения в связи с изменениями климата и систем пожароуправления (Global wildland..., 2013; Stocks, Hartley, 1995). Ожидается также, что повышение температур в бореальных районах будет значительнее, чем в среднем на планете, и риск увеличения



частоты пожаров в связи с изменениями климата в России выше, чем, например, в сходных условиях Канады (A comparison..., 2013; Global wildland..., 2013; Швиденко, Щепаченко, 2013). Изменение климата и увеличение частоты пожаров в бореальных лесах вызовет такое возрастание чистого CO<sub>2</sub>, которое приведет к возможности положительной обратной связи с глобальными температурами и к значительным последствиям для экосистем. Поэтому необходимо более глубокое понимание динамики пожарных процессов и их влияния на процессы, определяющие цикл углерода, и на состояние бореальных лесов.

В целях минимизации экологических, социальных и экономических последствий от природных пожаров необходимо иметь системные знания и представления о формировании условий для экстремальных пожарных режимов, прогнозировании развития природных пожаров и эмиссии продуктов горения, динамике горимости в условиях меняющегося климата, постпирогенной динамике и трансформациях растительных сообществ, почв и экосистем, прогностических оценках глобального бюджета углерода, природных, техно- и антропогенных факторах формирования рисков и последствий пожаров растительности.

Сложность решения проблем природных пожаров связана в том числе и с трудностями прогнозирования развития природных пожаров ввиду сложности и разномасштабности физико-химических процессов, разнообразия растительных горючих материалов (РГМ), влияния метеорологических факторов, отсутствия полноты начальных и граничных данных. В частности, такая важнейшая задача, как разработка методов численного моделирования пожаров и пожарных рисков, решается не один десяток лет во всем мире, но остается актуальной и сегодня.

Решение данной проблемы возможно только в рамках комплексной работы, объединяющей междисциплинарные исследования по ряду направлений: численное математическое моделирование процессов горения и развития природных пожаров; проведение и анализ наземных долговременных экспериментов на стационарных пробных площадях (послепожарные участки); изучение пирогенной трансформации гидротермических режимов почв и биологических маркеров для территорий, нарушенных пожарами; лабораторное моделирование процессов горения растительных горючих материалов; получение новых данных о химии и о кинетике процессов, лежащих в основе возникновения и распространения природных пожаров; дистанционный мониторинг и геопространственный анализ горимости; анализ метеорологических факторов и динамики пожарной опасности в современных условиях; моделирование рисков социальных и экономических последствий.

Сибирь – основная зона произрастания бореальных лесов, где сосредоточено более 50 % общемировых площадей светло- и темнохвойной тайги. Данные леса являются важнейшим компонентом устойчивого баланса на планете, поэтому современное состояние и возможная динамика этих экосистем являются актуальными проблемами экологии. Что определяет их устойчивое функционирование и возможные глобальные изменения? Прежде всего это климатические тренды, уровень антропогенного воздействия и природные факторы нарушенности, к которым следует отнести пожары растительности в качестве наиболее значимого.

Долговременные метеонаблюдения позволяют оценить возрастание аномалий температуры воздуха в приземном слое (IPCC, 2013; IPCC, 2014). В частности, межправительственная группа экспертов по изменениям климата (МГЭИК) констатирует инструментально зафиксированное повышение глобальной температуры на 0,72 °C к концу XX в. и на 0,85 °C – в первом десятилетии XXI в. (IPCC, 2014). Как и в циркумбореальной зоне в целом, на территории Сибири, начиная с 70–80-х гг. XX столетия, отмечены рост температуры, изменение режима выпадения осадков, увеличение длительности засушливых периодов (Изменения экстремальности..., 2012).

Такие изменения способны сыграть роль природного триггера в целом ряде процессов. Потепление неизбежно приведет к изменению структуры растительного покрова, перестройке иерархических уровней лесной растительности, переходу экосистем в «неустойчивую фазу» с вероятным нелинейным откликом даже на малые изменения (Tipping elements..., 2008; North American vegetation..., 2012). Прогнозируется все более значимое возрастание частоты и интенсивности засушливых периодов, что приведет к изменению пожарных режимов отдельных территорий, и проявление таких тенденций на региональном и особенно на субрегиональном уровнях фиксируется уже в настоящее время (Ваганов и др., 1998; Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б., 2014). Как следствие, пожары все в большей степени играют роль основного деструктирующего фактора, определяющего периодичность и направления вторичных сукцессий экосистем.

Проблема пожаров растительности актуальна практически для всех регионов мира, в частности, для бореальной зоны Евразии и Северной Америки, южных европейских стран и Австралии, экваториальной Африки и Южной Америки. На рубеже XX–XXI вв. тенденция повышения уровня горимости лесов свойственна практически для всего мира, включая Россию (Detecting the effect..., 2004; Sukhinin, 2008; Kharuk et al., 2008; Alaska's changing..., 2010; Miller et al., 2012).

Многочисленно отмечалось, что первая декада XXI в. характеризуется увеличением частоты возникновения пожаров и итоговых площадей, под-

вергающихся пирогенному воздействию, как в масштабах всего Северного полушария (Impacts of climate change..., 2009), так и в России, на территории Сибири в частности (Satellite Monitoring..., 2006, Kharuk et al., 2008a, 2008b, 2010; Изменение климата..., 2011). Отечественные и зарубежные эксперты приводят оценки площади ежегодных лесных пожаров в России на уровне 2–17 млн га (Determining effects..., 2002; AVHRR-based..., 2004; Влияние природных пожаров..., 2011). В таких оценках отражены и высокая вариабельность данных о пожарах, и возрастающий тренд горимости лесов в современных климатических условиях (Швиденко, Щепашенко, 2013; Пономарев, Швецов, 2013). По имеющимся оценкам ежегодное значение эмиссии углерода от пожаров составляет 121,0–137,0 Тг С/год (Determining effects..., 2002; Влияние природных пожаров..., 2011). В условиях прогнозируемых климатических изменений следует ожидать ужесточения пожарных режимов в лесах и зоне лесостепей и степей Сибири, что отразится и на динамике углеродных эмиссий от пожаров, которые, по разным оценкам, могут увеличиться вдвое до 240 Тг С/год во второй половине XXI в. (Влияние природных пожаров..., 2011; Vegetation Fires..., 2013; Швиденко, Щепашенко, 2013; Крупные пожары..., 2014). Изучение и прогнозирование ситуации с лесными пожарами требует использования объективных средств контроля, к каким относятся спутниковые мониторинговые комплексы.

## Глава 1

---

---

# ДИСТАНЦИОННЫЕ ДАННЫЕ В МОНИТОРИНГЕ ПОЖАРОВ В СИБИРИ НА РУБЕЖЕ XX–XXI вв.

### 1.1. Развитие системы спутникового мониторинга

Сегодня практически во всех направлениях научной деятельности, связанных с изучением природных процессов, широко применяется дистанционный мониторинг – методы и подходы сбора обобщения и пространственного анализа данных, основанные на спутниковой информации. Нет сомнений в том, что комплексные междисциплинарные исследования, объединяющие результаты наземных экспедиций, математического и физического моделирования, а также возможности геоинформационного анализа с привлечением съемки со спутников, являются современным и эффективным подходом к получению новых знаний, в том числе при решении задач лесной и экологической тематики. Так сегодня развивается наука во всем мире, используя передовые достижения космической отрасли. И так, кажется, было всегда? Но нет, 25 лет назад в нашей стране, неоспоримо занимающей одно из первых место в мире по развитию космических программ, использование спутниковой информации в задачах мониторинга было достаточно «экзотическим» направлением, которым занимались единицы. И Институт леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР (ИЛиД) был одним из тех институтов страны, где новые технологии нашли поддержку, активно изучались как с теоретических позиций, так и в применении на практике.

В серии сборников, издаваемых в ИЛиД, уже в 70-х гг. публиковались статьи о применимости дистанционных методов для регистрации лесных пожаров, анализировался зарубежный опыт использования спутниковой информации и предлагались собственные методы и подходы. Уже в то время было понятно, что мониторинг природных процессов на основе спутниковых данных может иметь применение в самом широком смысле. Знаковым изданием, вероятно, можно считать монографию «Исследование таёжных ландшафтов дистанционными методами» под редакцией чл.-корр. АН СССР Александра Сергеевича Исаева, опубликованную издательством «Наука» в 1979 г. (Исследование таежных ландшафтов..., 1979). В ней был дан обзор исследований таежных ландшафтов Сибири с использованием

аэрокосмических средств, освещались вопросы теории ландшафтно-структурного дешифрирования снимков, а также были рассмотрены основные тематические направления использования космоинформации при изучении таких вопросов, как динамика взаимоотношений леса и болота, возрастающая пирогенная динамика лесов, динамика гидрологического режима, фенологическое состояние растительности. Большое внимание было уделено методическим вопросам картографирования природно-территориальных комплексов, лесов, почв, болот, пожаров. Рассмотрены методы математической обработки массовой (термин несколько наивный для сегодняшней эпохи сплошной информатизации, блокчейнов и петабайтных баз данных!) информации, получаемой во время дешифрирования снимков при лесотаксационных и биометрических исследованиях. Авторы монографии уже тогда показали широчайший спектр перспектив, которые открываются с привлечением спутниковых данных, для специалистов различного профиля – географов, ландшафтоведов, лесоводов, почвоведов, пирологов, болотоведов, геоботаников – фактически всех направлений, представленных в ИЛиД.

В начале 90-х гг. XX в. в результате тесного взаимодействия с представителями аэрокосмического агентства США (NASA) Институт леса получил одну из первых в России станций приема и обработки спутниковой информации HRPT (High-Resolution Picture Transmission) Quorum Communications. Владелец – NASA Goddard Space Flight Center – передал оборудование Институту леса СО РАН во временное использование до 2020 г. Комплекс включал в себя систему приема, приемную антенну, очень мощный на то время сервер обработки графической информации IVAS, систему хранения и обработки данных. В целом система впервые позволяла принимать спутниковую информацию непосредственно в Красноярске, в режиме реального времени. Это обеспечило большие объемы данных спутниковой съемки, покрывающей всю азиатскую часть России от Урала до Сахалина. В том числе исследователи впервые увидели леса Сибири на всем широтном градиенте от Монголии до побережья Северного Ледовитого океана.

Для реализации нового направления тематического анализа данных со спутников в Институте леса (ИЛ СО РАН) была организована структура – Сектор аэрокосмических методов исследования, который возглавил Анатолий Иванович Сухинин. За короткий срок с момента установки оборудования в ИЛ СО РАН в конце 1994 г. подразделением успешно был пройден путь от построения первых тестовых снимков погоды и облачности до разработки целого ряда методик тематической обработки принимаемой спутниковой информации. К старту пожароопасного сезона 1995 г. уже оперативно велись работы по детектированию лесных пожаров, были по-

лучены первые в России карты вегетационного индекса растительности, позволяющие анализировать фенологические циклы на всей территории лесов Сибири, проводился мониторинг динамики снегового покрова, ледовой обстановки на реках Сибири, анализ метеорологических композитных снимков и параметров атмосферы на всем градиенте высот от поверхности Земли до границы стратосферы (рис. 1.1).

Наработки в области тематического анализа спутниковой информации в целях мониторинга пожаров в Сибири были внедрены в практику работы Красноярской базы авиационной охраны лесов, а также регионального подразделения МЧС. В дальнейшем эти методики были дополнены и расширены и составили основу функционирующей с начала 2000-х гг. системы спутникового мониторинга чрезвычайных ситуаций «Каскад» МЧС РФ (Кудрин, Резников, 2006).

Таким образом, в 1995 г. в Красноярске (впервые в России) фактически был создан центр спутникового мониторинга, тематическая направленность которого была намного шире, чем изначальное – метеорологическое – назначение доступных на тот момент спутниковых комплексов NOAA, оснащенных сканирующей аппаратурой низкого пространственного разрешения AVHRR и зондом атмосферного профиля TOVS. И важнейшими направлениями работы в течение всего времени существования подразделения были мониторинг пожаров в лесах Сибири, оперативный анализ пожароопасной обстановки, геопространственный анализ горимости, мониторинг послепожарного состояния нарушенных территорий и процессов лесовосстановления.

В настоящее время под руководством профессора Вячеслава Ивановича Харука в рамках исследований лаборатории мониторинга леса ИЛ СО РАН с применением спутниковых данных решается целый ряд комплексных задач:

- прогнозирование пожарной опасности и горимости лесов в условиях меняющегося климата;
- разработка математической модели для количественной оценки эмиссии углерода при пожарах в лесах Сибири на основе дистанционных инструментальных измерений, оценки прямых пожарных эмиссий углерода, как на региональном, так и на континентальном уровнях;
- мониторинг и прогнозы воздействия изменений климата на леса Сибири, величины прироста хвойных пород, жизненного состояния и продуктивности древостоев;
- моделирование и спутниковый мониторинг эффектов от тепловых аномалий подстилающей поверхности в сезонно-талом слое почв криолитозоны Сибири.

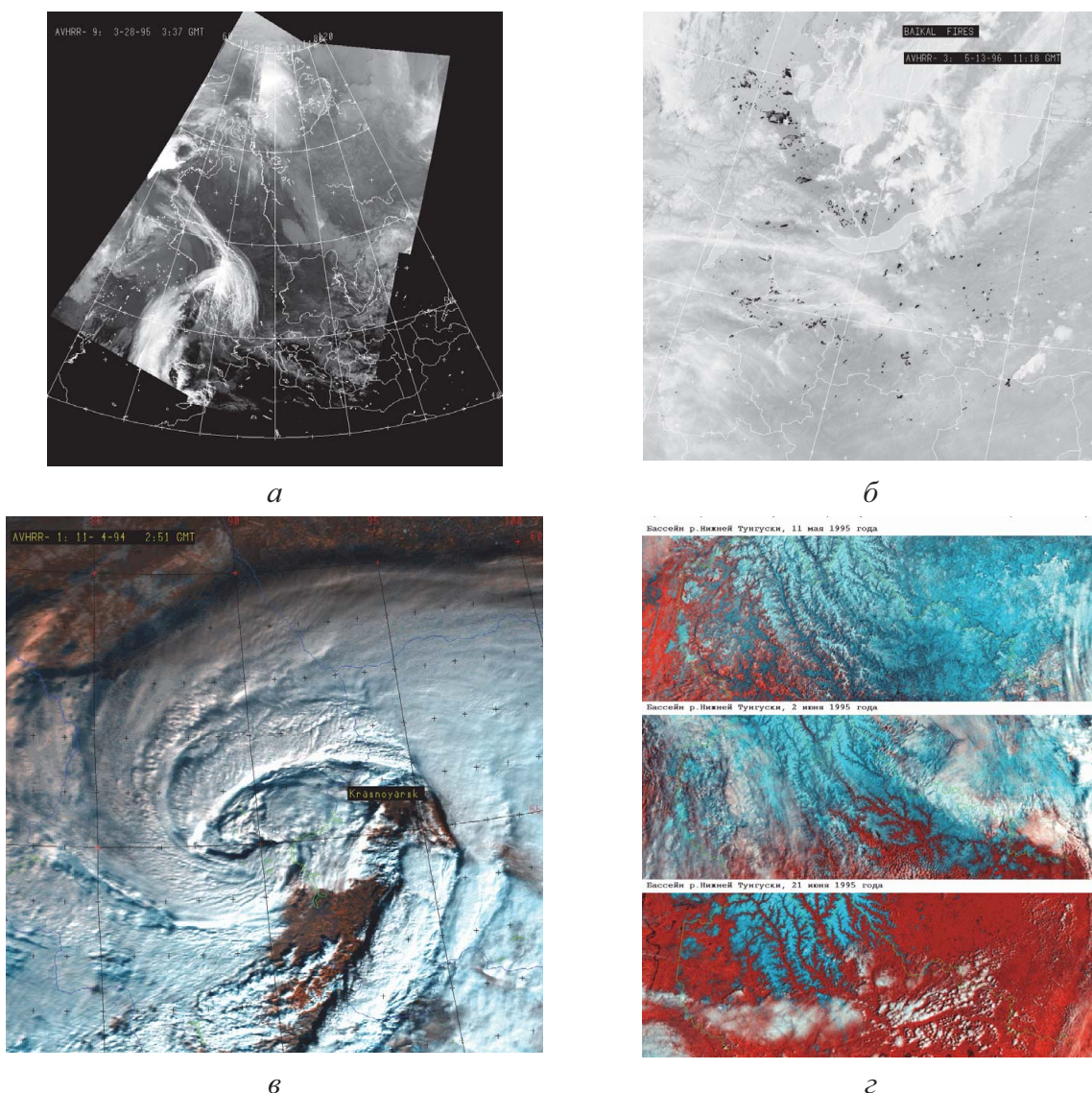


Рис. 1.1. Первые материалы съемки NOAA/AVHRR, полученной приемным комплексом ИЛ СО РАН: *а* – одно из первых композитных изображений облачности над территорией Сибири, выполненных в лаборатории мониторинга леса (28 марта 1995 г. Спутник NOAA-9, тепловой диапазон радиометра AVHRR); *б* – снимок действующих пожаров в районе оз. Байкал (13 мая 1996 г. Тепловой диапазон радиометра AVHRR); *в* – первое изображение, полученное приемным комплексом ИЛ СО РАН. Циклонический вихрь с центром над Красноярском (4 ноября 1994 г.); *г* – динамика схода снегового покрова в бассейне р. Нижняя Тунгуска (съемка NOAA/AVHRR, 1995 г.)

Fig. 1.1. The first NOAA/AVHRR imagery obtained by the IF SB RAS receiving complex: *a* – one of the first composite images of clouds over the territory of Siberia made in the laboratory of forest monitoring (March 28, 1995. Satellite NOAA-9, thermal band of the AVHRR radiometer); *б* – a snapshot of active fires in the Lake Baikal region (May 13, 1996. Thermal band of the AVHRR radiometer); *в* – the first image obtained by the receiving complex of the IF SB RAS. Cyclonic eddy centered over Krasnoyarsk (November 4, 1994); *г* – dynamics of snow cover melting in the basin of the Lower Tunguska river (NOAA/AVHRR imagery, 1995)

В начале XXI в. дальнейшее развитие системы спутникового мониторинга Института леса проходило в сотрудничестве с МЧС и Сибирским федеральным университетом. К 2007 г. в единый центр коллективного пользования входили уже три приемных комплекса: HRPT, «УНИСКАН-24» и «УНИСКАН-36» (НТЦ «СКАНЭКС», Москва, РФ). Существенно расширились возможности приема спутниковых данных, обеспечения решения мониторинговых задач в оперативном режиме, а для МЧС – в круглосуточном режиме.

С организацией Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» в 2017 г. аппаратная часть приемного комплекса была оснащена новой станцией «УНИСКАН-36» (НТЦ «СКАНЭКС», Москва, РФ), что позволило сформировать Единый региональный центр дистанционного зондирования Земли при партнерстве ФИЦ КНЦ СО РАН, госкорпорации «Роскосмос» и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. Это позволило продолжить перспективные работы по совершенствованию методов приема, тематической обработки и анализа спутниковой информации в целях проведения противопожарного мониторинга на территории Сибири.

В 2017 г. между Институтом леса СО РАН и The Global Fire Monitoring Center (GFMC, Max Planck Institute for Chemistry, Freiburg / Mainz, Germany) подписано соглашение о формировании Регионального евразийского центра мониторинга пожаров, наряду с уже действующим Региональным азиатским центром управления пожарами (Regional Central Asia Fire Management Resource Center, Монголия, Улан-Батор). Таким образом, данные о пожарах Сибири на современном этапе и в ближайшей перспективе существенно дополняют мировую систему противопожарного мониторинга и позволяют рассматривать вопрос о горимости лесов бореальной зоны Сибири не только на региональном уровне, но и в контексте изучения и понимания планетарных процессов.

Сегодня роль дистанционных средств контроля и сбора инструментальных данных на обширной территории Сибири нельзя переоценить. Внедрение новых технологий дистанционного контроля характеристик пожаров, воздействия на растительность и эмиссий углерода имеет большие перспективы быть реализованными в самое ближайшее время, так как существующие системы спутникового мониторинга постоянно модернизируются, в том числе сегмент российской космической программы.

На сегодняшний момент получен ряд уникальных результатов и обозначены перспективные направления исследований, основанных на технологиях дистанционного мониторинга пожаров в Сибири. Прежде всего, к таким актуальным направлениям относится разработанная система спутникового мониторинга пожаров растительности. Сформирован и ежегодно



пополняется банк данных пожаров на территории Сибири, основанный на материалах спутникового мониторинга. Геоинформационная база данных содержит более  $2 \cdot 10^6$  записей за период наблюдений 1996–2018 гг. Каждый из зафиксированных пожаров представлен в формате векторного полигона, оконтуривающего площадь, пройденную огнем (рис. П1, приложение). В список атрибутивных параметров каждого полигона пожара включены:

- площади термически активной зоны в каждый момент наблюдения пожара спутниковыми средствами;
- общая площадь полигона пожара, вычисленная средствами ГИС (географические информационные системы) с учетом поправочных коэффициентов для корректировки завышения;
- координаты пожара, привязанные к центрам полигонов;
- кратность регистрации в течение всего времени развития пожара;
- совокупная длительность детектирования пожара (время от первой до последней регистрации термически активной зоны);
- мощность теплоизлучения каждой из зафиксированных зон активного горения;
- характеристика типа леса, основанная на привязке к карте растительности.

Имеющийся массив данных уникален по своему наполнению и представляет собой один из самых долговременных и полных банков пожаров в лесах Сибири за последние 23 года на рубеже XX–XXI вв. Это является одним из важнейших условий проведения геопространственного статистического анализа горимости лесов Сибири в современном климате, выявления закономерностей пожарных режимов, трендов и прогнозирования возможных изменений и уровня пожарного воздействия в условиях климатических изменений (рис. П2, приложение).

## **1.2. Зона ответственности системы спутникового мониторинга**

В используемом на практике зонировании территории лесного фонда РФ (рис. 1.2) более 51 % лесов наблюдается спутниковыми методами регистрации и слежения за лесными пожарами (Сравнительный анализ..., 2008; Андреев, Брюханов, 2011). Дистанционные данные составляют важную часть системы мониторинга пожаров растительности в России, активно развиваются и применяются на практике на протяжении последних двадцати лет. Практическая значимость результатов дистанционного мониторинга пожаров общепризнана как в России, так и за рубежом.

В этих целях сегодня активно используются материалы мониторинговых спутниковых систем (NOAA/AVHRR, Terra/MODIS, NPP/VIIRS), как правило, имеющих низкое пространственное разрешение, а также съемки среднего и высокого пространственного разрешения (табл. П4–П8, приложение). В настоящее время появилась возможность регулярной работы с материалами российских спутников (табл. П15–П20, приложение). Основные технические характеристики, актуальные применительно к задаче противопожарного мониторинга, обобщены в табл. 1.1. Следует отметить, что спутниковые системы мониторингового плана в большей степени эффективны для детектирования термически активных участков в режиме реального времени. С учетом возможного приема информации от нескольких систем период обновления сведений может быть сокращен до 2–4 часов. В то же время более детальную информацию о послепожарном состоянии растительности и динамике послепожарных изменений можно получать только с привлечением данных более высокого разрешения, периодичность обновления которых в настоящее время составляет от 5 до 20 дней. В оптимальном режиме работы системы мониторинга пожаров необходимо привлечение широкого спектра спутниковых данных (табл. П9–П14, приложение).

Таблица 1.1

**Характеристики используемых спутниковых систем**

Характеристика	Спутниковая система / аппаратура						
	NOAA/ AVHRR	TERRA, AQUA/ Modis	Suomi NPP/ VIIRS	Landsat-8/ OLI	Sentinel-2	Ресурс-П	
Разработчик	NASA	NASA	NASA	NASA	ЕС космическое агентство (ESA)	Роскосмос	
Пространственное разрешение, м	1000	250; 500; 1000	375; 750	15; 30	10; 20; 60	2,5; 4; 23	
Охват территории в кадре, км	3000	2300	3000	185	290	38; 97	
Спектральный диапазон, мкм	0,58–12,5	0,45–14,38	0,40–12,48	0,43–1,39	0,44–2,19	0,48–0,9	
Частота обновления	6 часов	6 часов	12 часов	16 дней	5–10 дней	10 дней	
Эффективность	детектирования активных пожаров	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая
	послепожарного мониторинга	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая

Алгоритм обнаружения термически активных зон базируется на определении соотношения между значениями радиационной температуры участка поверхности (пикселя), измеренной спутниковым радиометром, и заданного порогового значения. Величина порога рассчитывается на основании средней температуры фона и ее среднеквадратичного отклонения в окрестности потенциального очага пожара с учетом эмпирически определенных числовых коэффициентов. Подобный подход к обнаружению термически активных зон широко применяется во многих альтернативных алгоритмах обнаружения пожаров, например в алгоритме FIRMS/NASA (Fire Information for Resource Management System) (Kaufman, 1998; An Enhanced Contextual..., 2003).

Спутниковые данные включены и в систему учета лесных пожаров ИСДМ (информационная система дистанционного мониторинга) «Рослесхоз», которая была внедрена в 2005 г. (Информационная система..., 2008; Оценка площади..., 2012), и в функционирующую с начала 2000-х гг. систему «Каскад» МЧС РФ (Кудрин, Резников, 2006).

Начиная с 1995 г. в исследовательских целях формировался банк данных о лесных пожарах, фиксируемых спутниковыми методами, в Красноярском Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Сухинин, 1996; Информационная система..., 2008). В основе системы сбора данных лежит обработка спутниковых данных NOAA/AVHRR (с 1995 г.) и TERRA/Modis (с 2007 г.), выполняемая в ФИЦ КНЦ СО РАН. Сегодня этот банк данных содержит информацию о пожарах растительности на азиатской части России за период 1996 – 2018 гг. (Пономарев, Швецов, 2013).

На рубеже XX–XXI вв. проблема лесных пожаров приобретает все большую актуальность. В тот же период были разработаны основные подходы к инструментальному спутниковому мониторингу пожаров, что обеспечило пул объективной информации о горимости лесов в планетарном масштабе. По нашему мнению, только всесторонний анализ актуальной информации о пожарах позволяет контролировать вопросы, связанные со снижением пожарных рисков, минимизацией экологических и экономических потерь и предотвращением человеческих жертв, которые остро стоят во многих странах мира, включая и Россию. Высокие показатели числа пожаров и площадей, пройденных огнем, регистрируются ежегодно в различных регионах на территории Сибири. В 2010 г., наряду с экстремальной горимостью европейской части России (Бондур, 2011; Бондур и др., 2016), зафиксировано более 18 тыс. пожаров в лесной и лесостепной зонах юга Сибири. В 2011 г. число пожаров превышало 24 тыс. Экстремальная ситуация сложилась в 2012 г.: в течение пожароопасного сезона (март – сентябрь) на территории Сибири произошло более 23 тыс. пожаров. При этом было зафиксировано более 2200 крупных и экстремально крупных пожаров,

площадь которых превышала 2000 га. Отмечено, что пожары в Сибири в 2012 г. обусловили экстремальный вклад в эмиссию углерода в атмосферу (Assessment of biomass..., 2012), что определялось показателями горимости, существенно превышающими значения предыдущего периода спутниковых наблюдений 1999–2010 гг. (Sukhinin, 2008; Влияние природных пожаров..., 2011). Наиболее крупные пожары в последние годы повторялись на территории Якутии, в Прибайкалье, на севере Красноярского края, в Эвенкии, Томской области и Республике Тыва.

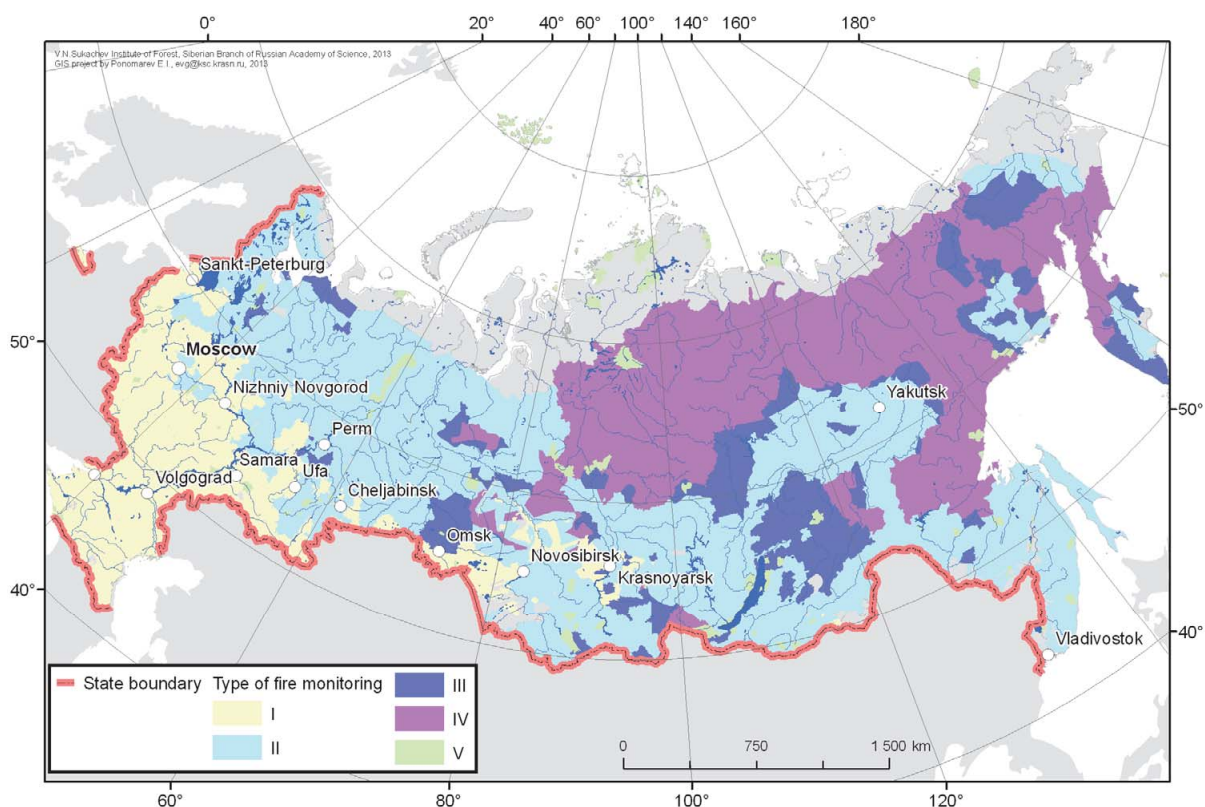


Рис. 1.2. Зоны мониторинга: I – зона наземной охраны; II – зона авиационной охраны; III, IV – зоны спутникового мониторинга; V – особо охраняемые территории (ООПТ)

Fig. 1.2. Monitoring zones: I – ground protection zone; II – aviation protection zone; III, IV – satellite monitoring zones; V – specially protected territories

По нашим оценкам на территории Сибири от 70 до 90 % общих площадей, пройденных огнем, приходится на экстремально крупные пожары. Из общего числа пожаров, детектируемых спутниковыми методами, до 45 % распространяются на площадях менее 100–200 га, около 50 % пожаров имеют площади до 1000 га, а 5 % составляют пожары, относимые к категории крупных, площади которых превышают 2000 га. Такие пожары в течение пожароопасного сезона могут оставаться активными до 30 и более дней, в ряде случаев достигая итоговых площадей свыше 50 тыс. га.