

УДК: 911.2:630.11:551.34

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-37-45

А.А. Медведков^{1,2}, М.В. Котова¹

**ОЦЕНКА ПРОТИВОПОЖАРНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ
ЗАПОВЕДНОГО ПРИБАЙКАЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ
ТЕПЛОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЁМКИ
(НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ БАЙКАЛО-ЛЕНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА)**

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается опыт сравнительной оценки противопожарного потенциала разных типов леса в условиях южной криолитозоны. Представленная методология базируется на обработке данных тепловой инфракрасной съёмки со спутника Landsat TM. На этой основе получены температуры поверхности для участков с разными лесорастительными условиями и биопродукционными характеристиками. Данный подход апробирован на примере условно-коренных ландшафтов Байкало-Ленского государственного природного заповедника, располагающегося в центральной экологической зоне Байкальской природной территории. Возможность использования температур поверхности для оценки противопожарной роли разных типов леса опирается на уравнение теплового баланса земной поверхности. Полученные по результатам обработки тепловых инфракрасных снимков термические значения отражают меру выброса ландшафтом потока явного тепла. Значения приповерхностных температур различаются по типам леса. Типы леса с наиболее высокой противопожарной ролью отличаются более высоким потенциалом влагообмена и наименьшими значениями приповерхностных температур. Выявлено, что леса на многолетнемерзлых породах имеют более высокие значения приповерхностной температуры. Наиболее пожароопасные лесные ландшафты в геоморфологическом отношении оказались приуроченными к долинам межгорных понижений, низинам, днищам котловин, предгорным возвышенностям и пологим склонам — в разной степени переувлажнённым территориям с островами льдистых пород и пониженными значениями фитомассы. Такие природные комплексы наиболее пожароопасны в периоды продолжительных засух, что обусловлено их пониженным транспирационным потенциалом и, соответственно, их меньшим влиянием на микро- и мезоклимат, в сравнении с лесами на талых породах. Данная методика апробирована на контрастных по лесорастительным условиям территориях бореальной криолитозоны и может быть применена в аналогичных по ландшафтно-географическим характеристикам районах России, Канады и США. Данный подход также может быть использован для совершенствования системы пожарной безопасности в российских заповедниках лесной зоны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: природные факторы пожароопасности, горимость леса, тепловой инфракрасный диапазон, лес на мерзлоте, Байкальская природная территория

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, г. Москва, Россия; *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru; mariakot121212@gmail.com

² Московский государственный областной университет, ул. Веры Волошиной, д. 24, 141014, г. Мытищи, Московская область, Россия; *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

Aleksey A. Medvedkov^{1,2}, Maria V. Kotova¹

**EVALUATION OF THE FIRE- FIGHTING POTENTIAL OF FOREST LANDSCAPES
OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY
USING THERMAL INFRARED INFORMATION DATA
(ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF THE BAIKAL-LENA RESERVE)**

ABSTRACT

The article considers the experience of a comparative assessment of the fire potential fire-stop capability of different types of forests in the conditions of southern permafrost zone. The presented methodology is based on the processing of thermal infrared data from the Landsat TM satellite. On this basis, there were obtained surface temperatures for sites with different forest growing conditions and bioproduction characteristics. This approach has been tested on the example of modal landscapes of the Baikal-Lena State Nature Reserve, located in the central ecological zone of the Baikal natural territory. The possibility of using surface temperatures to estimate the fire-fighting role of different types of forests is based on the equation of the heat balance of the earth's surface. The thermal values obtained from the processing of thermal infrared images reflect the measure of the emission of sensible heat flux by the landscape. Near-surface temperatures vary by forest type. Forest types with the highest fire-fighting role are characterized by a higher moisture exchange potential and the lowest surface temperature values. It has been revealed that forests on permafrost have higher surface temperature values. Most fire vulnerable forest landscapes coincide with valleys of intermountain depressions, lowlands, bottom of bolsons, submontane uplands and smooth hillsides. Those have different degree of water-logged areas with islands of permafrost and low values of phytomass. Those nature complexes are more fire-dangerous in periods of long droughts due to lower transpiration potential and less influence on micro- and mesoclimat as compared with forest on unfrozen rocks. This technique has been tested in contrasting forest-growing areas of the boreal permafrost zone and can be applied in regions of Russia, Canada and the United States that are similar in terms of landscape and geographic characteristics. This approach can also be used to improve the fire safety systems in Russian forest reserves.

KEYWORDS: natural fire hazard factors, forest burning, thermal infrared range, permafrost forest, Baikal natural territory

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ландшафты Байкальского региона подвергаются воздействию глобального потепления климата. Так, рост среднегодовой температуры приземного воздуха в этом регионе существенно превышает средние значения по миру [Шимараев и др., 2002], а интенсивность потепления проявляется ярче, чем на большей части остальной территории России. Так, темп роста сезонной (май – октябрь) температуры приземного воздуха за период 1976–2015 гг. составил +0,37 °C/10 лет [Потёмкина и др., 2018]. Также в связи с усилением засух в зоне водосбора к 2014 г. доля поверхностной составляющей стока снизилась более чем на 50 %, причем данная ситуация сохранялась и в течение 2015–2016 гг. Наряду с этим проявляется активизация таяния льдистых пород [Потёмкина и др., 2016]. Данные обстоятельства способствуют увеличению опасности лесных пожаров. Этому также благоприятствует рост в водоохранной зоне Байкала продолжительности

¹ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; e-mail: a-medvedkov@bk.ru; mariakot121212@gmail.com

² Moscow State Regional University, Vera Voloshina str., 24, 141014, Mytishchi, Moscow region, Russia; e-mail: a-medvedkov@bk.ru

пожароопасного периода (в среднем до 170 дней) за последние 40 лет [Макаренко, 2016]. Эта тенденция типична не только для Байкальской природной территории, она присуща и другим регионам Сибири. Так, в результате многолетнего (1996–2016 гг.) спутникового мониторинга выявлено, что за этот период горимость сибирских лесов выросла [Пономарёв и др., 2017]. При обычных погодных условиях в байкальских лесах за год возникает около 700–900 пожаров, но в годы погодных аномалий частота горимости лесов может возрастать в 3–4 р. [Евдокименко, 2011].

К настоящему моменту проведены многочисленные лесопирологические исследования. Однако большинство исследователей — лесоведов и геоботаников — в своих работах рассматривает, в первую очередь, такой фактор пожароопасности, как наличие и состояние лесных горючих материалов — потенциально пожароопасных растительных остатков разной степени разложения (ЛГМ) [Курбатский, 1970]. Дальнейшее развитие данного фактора прослеживается в современных работах по лесной экологии и лесоведению [Волокитина, 2017 и др.].

Тем не менее, на фактическую горимость лесов оказывают влияние не только характеристики ЛГМ рассматриваемой территории, но также её микро- и мезоклиматические особенности, обусловленные в значительной степени ландшафтно-геофизическими особенностями конкретного типа леса и совокупностью его лесорастительных условий. Указанное обстоятельство подчеркивает необходимость исследования роли других факторов, влияющих на лесопирологическую обстановку, помимо собственно запасов горючих растительных материалов. Для наиболее полной и более достоверной оценки факторов, влияющих на пожароопасную ситуацию, предлагается рассматривать транспирационный потенциал разных типов леса. Данное предложение обосновано тем, что весь обмен водяного пара в лесу связан с испарением, перехватом осадков растительностью и транспирацией в форме переноса влаги в приземную часть атмосферы [Снурр, Барнес, 1984]. В этом проявляется роль лесного массива в формировании своего теплового режима при разных типах погод [Галенко, 2013].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках исследования природных факторов пожароопасности особый интерес представляют условно-коренные ландшафты со строгим режимом охраны, где антропогенное влияние практически полностью исключено. В связи с чем, применительно к задачам данного исследования и учитывая степень ландшафтного разнообразия (в т.ч. бореальных геосистем), нами в качестве репрезентативной была выбрана территория Байкало-Ленского государственного заповедника. Заповедник располагается в области распространения прерывистой и островной вечной мерзлоты, что наряду с горным рельефом существенно повышает мозаичность природно-ландшафтных условий исследуемой территории [Байкал, 1993]. На территории заповедника представлены все основные типы природных комплексов Прибайкалья: нивальные и гольцовые, горно-таёжные, лесостепные, степные и прибрежные. Самую большую площадь занимают лесные ландшафты (более 85 %), основная часть которых представлена хвойными породами: лиственницами сибирской и Чекановского (переходным видом к лиственнице Гмелина), сосной обыкновенной, кедром (сосной сибирской), елью и пихтой сибирской. Из мелколиственных пород встречаются осины, ивы и березы. В переувлажненных низинах и долинах широко распространены ерниковые ландшафты, а по горным склонам — заросли кедрового стланика. На данные комплексы приходится около 20 % территории заповедника.

Известно, что ландшафты бореальной криолитозоны наиболее уязвимы к пожарам в летние периоды с продолжительными засухами. Поэтому в данной работе нами рассматривались изображения спутниковой системы Landsat 8, полученные не только за периоды с

активной вегетацией, но и с наблюдающимися стабильно высокими температурами и засушливой погодой в 2013, 2014 и 2015 гг.

Исходя из анализа тепловых инфракрасных снимков, обобщения результатов полевых исследований в аналогичных условиях [Медведков, 2016] и опубликованных материалов [Балдина, Грищенко, 2014], было установлено, что распределение интенсивности теплового излучения зависит от мощности растительного покрова (т.е. запасов фитомассы). Данный факт также получил подтверждение и по результатам расчёта нормализованного относительного индекса растительности (NDVI).

Также в рамках данного исследования были использованы другие материалы: цифровая модель рельефа (ЦМР) и открытые данные ГИС-порталов (карта пожаров СКАНЭКС, цифровые ландшафтные карты и др.). Для анализа и обработки данных использовалось геоинформационное программное обеспечение ArcGIS и QGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализировав значения приповерхностных температур и показатели NDVI и воспользовавшись информацией об очагах пожаров за экстремально жаркие летние периоды 2011–2017 гг., на территории Байкало-Ленского заповедника авторы выделили наиболее уязвимые к пожарам лесные ландшафты (рис. 1). Была отмечена взаимосвязь между значениями полученных показателей и фактической горимостью лесов на его территории. Отметим, что высокая мозаичность природно-ландшафтных условий местами усиливает дисперсию термических характеристик, что в некоторой степени осложняет проведение анализа полученных результатов. Тем не менее в целом можно говорить о хорошо выраженной взаимосвязи между рассматриваемыми показателями и очагами возгорания. Ранжирование разных типов леса производилось по результатам анализа температурных карт, полученных путём обработки данных со спутников с Landsat TM. В этом отношении мы методически базируемся на выводе М. И. Будыко [1977], что уравнение теплового баланса суши для среднего годовичного периода имеет вид

$$R=LE + P,$$

где LE — затраты тепла на испарение (поток скрытого тепла) и P — турбулентный поток явного тепла от подстилающей поверхности.

Параметр LE напрямую связан с состоянием и типом растительности, в связи с этим представляется возможным установить корреляционную связь между характеристиками растительного покрова и потоком явного тепла, выраженного в форме приповерхностной температуры. Для того чтобы оценить поведение турбулентных потоков в ходе водоэнергетического обмена, необходимо выявить их пространственное распределение над различными в биогеофизическом отношении типами подстилающей поверхности [Тепловодообмен..., 2007], что возможно выполнить с использованием ДДЗ. Как было определено ранее, тип леса влияет на значение приповерхностных температур, т.к. от типа леса зависит его транспирационный потенциал. При этом чем выше поток явного тепла от поверхности, тем ниже поток скрытого тепла в форме транспирации. Транспирация подразумевает испарение с растительного покрова, поэтому можно говорить о том, что при увеличении значений потока явного тепла снижается роль ландшафта во влагообмене. Ландшафт с минимальным выбросом явного тепла имеет самый высокий потенциал влагообмена и более низкие значения поверхностной температуры [Медведков, 2013; Горшков, 2015].

В ходе сравнительной оценки изначально выделялись нелесные ландшафты (гольцовые и горно-тундровые), не рассматривающиеся в рамках данного исследования. Отметим, что гольцовые и горно-тундровые ландшафты, а также гари характеризуются очень высокими значениями приповерхностных температур (35–40° и более), что объясняется их небольшими, в сравнении с лесными комплексами, запасами живой фитомассы и незначительным транспирационным потенциалом. Соседство с такими комплексами приводит к тому, что гипсометрически ниже расположенные леса часто загораются от огня, очаг

которого располагается выше (в нелесной зоне). Подобные явления происходили при катастрофических пожарах летом 2015 г., когда горно-тундровые ландшафты оказались как источниками возгораний, так и фактором распространения огненного пламени на соседние ландшафты.

Выявленная взаимосвязь между потоками явного тепла и горимостью лесных ландшафтов позволила дифференцировать природные комплексы по противопожарному потенциалу на 4 основные категории (рис. 1). Далее нами был произведен анализ ландшафтно-географических факторов, обуславливающих противопожарный потенциал каждой из рассматриваемых категорий.

Для ландшафтных структур с очень низкой противопожарной устойчивостью характерны относительно высокие значения (30° и выше) приповерхностных температур и пониженные значения NDVI (рис. 2). Данные лесные ландшафты занимают более половины территории заповедника (68,8 %). В геоморфологическом отношении такие природные комплексы, перекрытые дисперсными отложениями, приурочены к долинам межгорных понижений, днищам котловин, низинам и склоновым поверхностям с незначительной крутизной. Здесь формируются условия с застойным режимом увлажнения, что способствует сохранению льдистых пород и их широкому распространению. Данные факторы ухудшают лесорастительные условия, что ведёт к увеличению потока явного тепла в связи с пониженной транспирирующей ролью растительного покрова в рассматриваемой обстановке. Здесь получили развитие ерниковые заросли и угнетённые формы лиственнично-еловой, кедрово-лиственничной, елово-кедровой и пихтово-кедровой тайги.

Для природных комплексов с низкой устойчивостью также типичны относительно высокие значения приповерхностных температур (25° и выше) и пониженные значения NDVI. На эти геосистемы приходится 7,2 % площади искомого заповедника, их древесная растительность представлена пихтово-кедровой и лиственничной тайгой с характерными признаками угнетённости. Данные геосистемы по своей биогеофизической роли и формирующим их лесорастительным условиям схожи с предыдущим типом. Отличие состоит в том, что указанные лесные комплексы существуют в условиях лучшей дренированности и характеризуются большими запасами живой фитомассы. Более высокая степень дренированности обусловлена широким распространением обломочных пород и большей крутизной склоновых поверхностей.

Лесные ландшафты со средней противопожарной устойчивостью обладают промежуточными (в сравнении с другими) значениями приповерхностных температур ($\sim 20\text{--}25^{\circ}$) и повышенными или средними значениями NDVI. Занимаемая ими площадь составляет 2,8 %. Данные комплексы состоят из кедрово-пихтовой и кедрово-лиственничной тайги оптимального развития с фрагментами лугово-степной растительности. Они приурочены преимущественно к выходам плотных карбонатных пород, перекрытых чехлом из обломочных отложений, а в рельефе представлены склоновыми поверхностями средней крутизны и предгорными возвышенностями.

Высокоустойчивые лесные ландшафты имеют низкие значения приповерхностных температур ($\sim 15\text{--}20^{\circ}$) и повышенные показатели индекса NDVI. На данные природные комплексы приходится 2,2 % площади Байкало-Ленского заповедника. В указанную категорию отнесены леса оптимального развития, представленные кедрово-пихтовой и сосновой тайгой. Сосновая тайга с хорошо развитым кустарниковым подлеском приурочена к сложным обломочными породами хорошо дренируемым днищам котловин. Кедрово-пихтовая тайга с наибольшими для территории заповедника запасами живой фитомассы получила развитие на склонах средней крутизны, выработанных в плотных карбонатных и др. кристаллических породах. Общеизвестно, что наличие карбонатных пород сказывается на увеличении биологической продуктивности фитоценозов. Так, леса, произрастающие на карбонатных отложениях, обладают большими запасами фитомассы, что фиксируется по

результатам расчёта индекса NDVI. Такие комплексы активнее участвуют во влагообмене, что делает их климатически более значимыми.

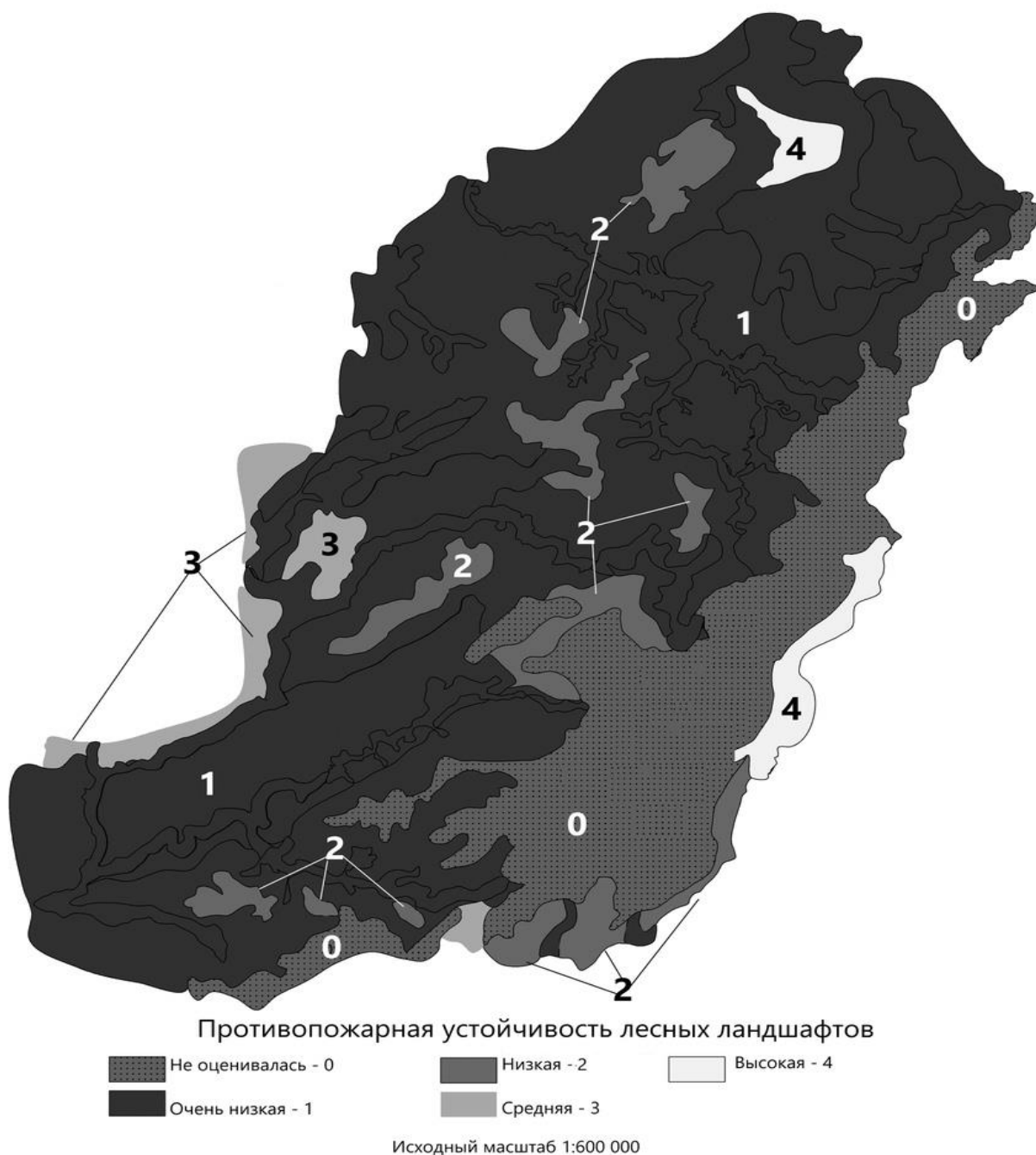


Рис. 1. Ранжирование лесных ландшафтов Байкало-Ленского заповедника по противопожарной устойчивости

Fig. 1. Ranking forest landscapes of the Baikal-Lena nature reserve by fire-resistance capability

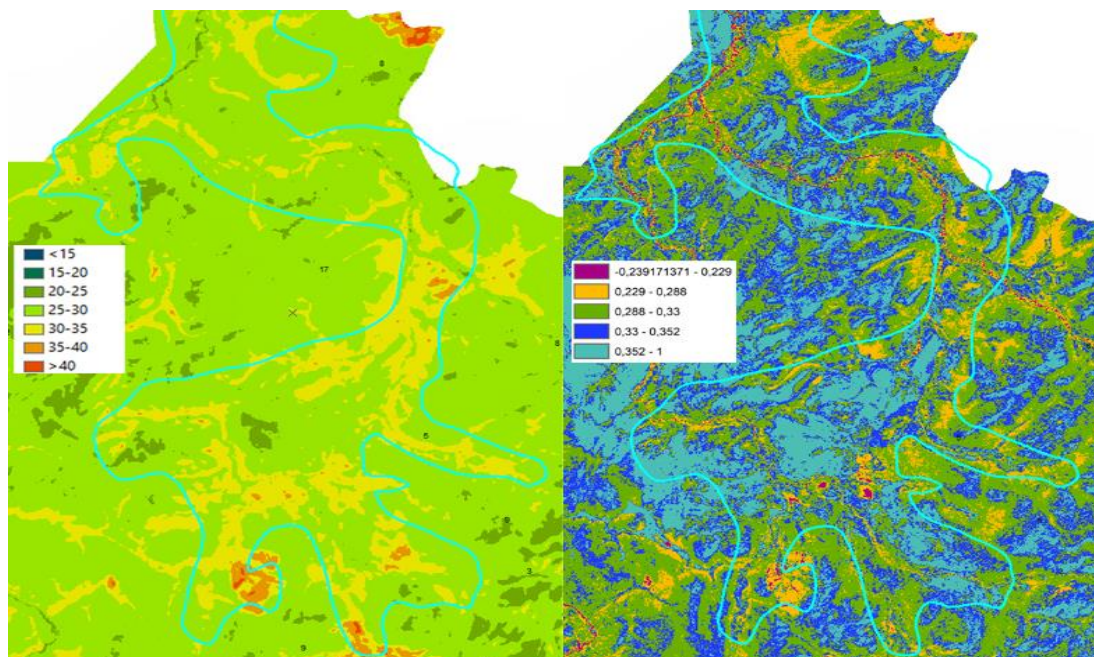


Рис. 2. Низины, выработанные в кристаллических породах и перекрытые дисперсными отложениями под заболоченными редкостойными лиственнично-елово-кедровыми лесами (слева — фрагмент карты с температурами поверхности, справа — со значениями NDVI)

Fig. 2. Waterlogged lowlands with rare taiga (on the left — a fragment of the map with surface temperatures, on the right — with NDVI values)

ВЫВОДЫ

Выявлено, что более 75 % территории заповедника характеризуется наибольшей уязвимостью к лесным пожарам. Наиболее пожароопасные лесные ландшафты оказались приурочены к долинам межгорных понижений, низинам, днищам котловин, предгорным возвышенностям и пологим склонам — в разной степени переувлажнённым территориям с островами льдистых пород и пониженными значениями фитомассы. В таких гипсометрических понижениях формируется застойный тип водного режима, что способствует сохранению льдистых пород. Многолетнемёрзлые породы участвуют в создании особой структуры растительного покрова (угнетённость и разреженность древостоя, широкое распространение ерников, низкий биопродукционный потенциал). Это обуславливает повышенные термические характеристики данных ландшафтов на картах приповерхностных температур [Медведков, 2016; 2018; Борисов и др., 2017]. Данные природные комплексы представлены ерниковыми зарослями и редкостойной тайгой, которые в летние периоды с продолжительной засухой не только не выполняют роль противопожарных барьеров, а скорее являются источниками повышенной пожароопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкал. Атлас. М.: Роскартография, 1993. 160 с.
2. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2014. № 3. С. 35–41.
3. Борисов Б.З., Фёдоров П.П., Чикидов И.И., Десяткин А.Р. Выделение многолетнемёрзлых пород в зоне их островного распространения по тепловым каналам спутниковых снимков Landsat-7 ETM+. Успехи современного естествознания, 2017. № 5. С. 78–82.

4. Будыко М.И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 328 с.
5. Волокитина А.В. Совершенствование оценки природной пожарной опасности в заповедниках. География и природные ресурсы, 2017. № 1. С. 55–61. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2017-1(55-61).
6. Галенко Э.П. Энергетические факторы продуктивности хвойных лесов северной тайги. Известия АН СССР. Серия географическая, 1976. № 4. С. 84–89.
7. Горшков С.П. Организованность биосферы и устойчивое развитие. Жизнь Земли, 2015. Т. 37. С. 62–84.
8. Евдокименко М.Д. Факторы горимости Байкальских лесов. География и природные ресурсы, 2011. № 3. С. 51–57.
9. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов. Вопросы лесной пирологии. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачёва СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
10. Макаренко Е.Л. Лесные пожары и их последствия в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории. Интерактивная наука, 2016. № 5. С. 9–12. DOI: 10.21661/г-111897.
11. Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 380–384. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384.
12. Медведков А.А. Подходы к оценке противопожарной функции лесных ландшафтов в условиях бореальной криолитозоны. Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата (ГЕОРИСК-2018). М.: РУДН, 2018. Т. 2. С. 209–213.
13. Медведков А.А. Среднетаёжные геосистемы бассейна р. Енисей в условиях меняющегося климата. Дис. ... канд. геогр. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2013. 186 с.
14. Пономарёв Е.И., Харук В.И., Якимов Н.Д. Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири. Сибирский лесной журнал, 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS20170503.
15. Потёмкина Т.Г., Потёмкин В.Л., Гусева Е.А. Озёрно-речная система оз. Байкал – р. Селенга в условиях изменяющейся окружающей среды. Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2016. № 2 (55). С. 103–115. DOI: 10.21285/0301-108X-2016-55-2-103-115.
16. Потёмкина Т.Г., Потёмкин В.Л., Федотов А.П. Климатические факторы как риски современных экологических изменений в береговой зоне озера Байкал. Геология и геофизика, 2018. Т. 59. № 5. С. 690–702. DOI: 10.15372/GiG20180508.
17. Спурр С.Г., Барнес Б.В. Лесная экология: пер. с 3-го англ. изд. М.: Лесная промышленность, 1984. 480 с.
18. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы. М., Тверь: Триада, 2007. 575 с.
19. Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В. Климат и гидрологические процессы в бассейне оз. Байкал в XX столетии. Метеорология и гидрология, 2002. № 3. С. 71–77.

REFERENCES

1. Baikal. Atlas. Moscow: Roskartography, 1993. 160 p. (in Russian).
2. Baldina E.A., Grishhenko M.Ju. Methodics for deciphering multi-temporal satellite images in the thermal infrared range. Herald of Moscow University. Series 5. Geography, 2014. No 3. P. 35–41 (in Russian).

3. *Borisov B.Z., Fyodorov P.P., Chikidov I.I., Desyatkin A.R.* Identifying of permafrost in the zone of their island distribution through the thermal channels of satellite images Landsat-7 ETM +. *Advances in Current Natural Sciences*, 2017. No 5. P. 78–82 (in Russian).
 4. *Budyko M.I.* Global geocology. Moscow: Mysl', 1977. 328 p. (in Russian).
 5. *Evdokimenko M.D.* Factors of fires in the Baikal forests. *Geography and Natural Resources*, 2011. No 3. P. 51–57 (in Russian).
 6. *Galenko E.P.* Energy factors of productivity of coniferous forests of the northern taiga. *News of the Academy of Sciences of USSR. Geographical Series*, 1976. No 4. P. 84–89 (in Russian).
 7. *Gorshkov S.P.* Organization of the biosphere and sustainable development. *The Life of The Earth*, 2015. V. 37. P. 62–84 (in Russian).
 8. Heat and moisture exchange in permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors. Moscow, Tver: Triada, 2007. 575 p. (in Russian).
 9. *Kurbatskij N.P.* Study of the quantity and properties of forest combustible materials. *Questions of forest pyrology*. Krasnoyarsk: Institute of Forests and Wood named after V.N. Sukachev, SB AS USSR, 1970. P. 5–58 (in Russian).
 10. *Makarenko E.L.* Forest fires and their consequences in the Central ecological zone of the Baikal natural territory. *Interactive science*, 2016. No 5. P. 9–12. DOI: 10.21661/r-111897 (in Russian).
 11. *Medvedkov A.A.* Approaches to the assessment of the fire function of forest landscapes in the conditions of the boreal permafrost zone. *The analysis, the prediction and the management of natural risks in the modern world (GEORISK–2015)*. Moscow: RUDN University, 2018. V. 2. P. 209–213 (in Russian).
 12. *Medvedkov A.A.* Mapping of cryogenic landscapes based on the analysis of thermal images. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: Moscow University Press, 2016. V. 22. Part 1. P. 380–384. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384 (in Russian).
 13. *Medvedkov A.A.* Mid-taiga geosystems of the Yenisei River basin in a changing climate. PhD diss. of geogr. sc. Moscow: Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2013. 186 p. (in Russian).
 14. *Ponomarev E.I., Haruk V.I., Jakimov N.D.* Results and prospects of satellite monitoring of natural fires in Siberia. *Siberian Journal of Forest Science*, 2017. No 5. P. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS20170503 (in Russian).
 15. *Potemkina T.G., Potemkin V.L., Guseva E.A.* The fluviolacustrine system of lake Baikal — the Selenga river under changing environmental conditions. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*, 2016. V. 55. No 2. P. 103–115. DOI: 10.21285/0301-108X-2016-55-2-103-115 (in Russian).
 16. *Potemkina T.G., Potemkin V.L., Fedotov A.P.* Climatic factors as risks of modern environmental changes in the coastal zone of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics*, 2018. V. 59. No 5. P. 690–702. DOI: 10.15372/GiG20180508 (in Russian).
 17. *Shimaraev M.N., Kuimova L.N., Sinyukovich V.N., Tsekhanovskii V.V.* Climate and hydrological processes in Lake Baikal in the 20th century. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2002. No 3. P. 71–77 (in Russian).
 18. *Spurr S.G., Barnes B.V.* Forest ecology: translation from 3rd English ed. Moscow: Forest Industry, 1984. 480 p. (in Russian).
 19. *Volokitina A.V.* Improving the assessment of natural fire hazard in nature reserves. *Geography and Natural Resources*, 2017. No 1. P. 55–61. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2017-1(55-61) (in Russian).
-