



УДК 911.52+528.88+1-925.16

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.100>

Противопожарный потенциал и горимость лесных геосистем Западного Забайкалья (на примере Чикой-Хилокского междуречья)

А. А. Фролов

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. На основе ландшафтно-геоморфологической карты с использованием данных дистанционного зондирования Земли проанализированы локальные внутриландшафтные условия и особенности лесных геосистем территории Чикой-Хилокского междуречья (рельеф, характер подстилающих пород и почв, растительность), определяющие их противопожарный потенциал. Основой оценки противопожарного потенциала лесных геосистем послужил анализ уровня влагообмена между компонентами геосистем в системе почва – растительность – атмосферный воздух, характеризующего микро- и мезоклиматические особенности ландшафтов. Для определения влагообменного потенциала проведен совместный анализ индексных изображений, характеризующих приповерхностные температуры (LST) и влажность (NDMI), которые рассчитаны на основе инфракрасных каналов космических снимков Landsat 8 OLI и TIRS. Совместный анализ индексных изображений на ландшафтно-геоморфологической основе позволил провести экспертную оценку противопожарного потенциала различных типов лесных геосистем. Достоверность оценки противопожарного потенциала подтвердилась анализом фактической горимости лесов за последние полвека, проведенным на основе временного ряда космических снимков Landsat 1–5 MSS, 4–5 TM, 7 ETM+, 8 OLI, полученных в разные годы с 1977 по 2020-й.

Ключевые слова: противопожарный потенциал геосистем, горимость лесов, данные ДЗЗ, ландшафтно-геоморфологическая карта, Западное Забайкалье.

Для цитирования: Фролов А. А. Противопожарный потенциал и горимость лесных геосистем Западного Забайкалья (на примере Чикой-Хилокского междуречья) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 38. С. 100–114. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.100>

Введение

В настоящее время научные исследования, проводимые во многих странах мира, фиксируют устойчивую тенденцию роста уровня горимости лесных геосистем как в Северном полушарии в целом, так и в России в частности [Large wildfire trends ... , 2014; Alaska's changing fire ... , 2010; Kharuk, Ranson, Dvinskaya, 2008; Impacts of climate change ... , 2009; Satellite monitoring of forest ... , 2006; Ponomarev, Kharuk, Ranson ... , 2016]. При этом до 70–90 % ежегодного количества лесных пожаров, произошедших на территории России, приходится на районы Сибири [Extreme fire events ... , 2012; Shvidenko, Schepaschenko, 2013; A comparison of Canadian ... , 2013]. В конце XX и начале XXI в. рост числа возгораний и площади лесных пожаров стал серьезной проблемой для России и особенно для Байкальского региона. Так,

доля площадей, пройденных пожарами, в Байкальском регионе до 90-х гг. в среднем составляла около 1–2 %, а за последние годы превысила 10–20 % от общероссийских показателей [Борисова, 2017]. Особенно опасная ситуация складывается в южной части Байкальского региона – в Забайкалье, где положение усугубляется сложными природно-климатическими условиями (жаркий засушливый климат в теплый пожароопасный период года в сочетании с продолжительными ветрами, горный и горно-котловинный характер рельефа, преобладание сосновых и лиственничных древостоев высокого класса пожарной опасности в лесных геосистемах), усиливающими влияние пирогенного фактора на развитие лесных геосистем.

Одна из основных причин увеличения горимости лесных геосистем – это изменение климата в сторону повышения среднегодовых температур воздуха и уменьшения количества осадков. Согласно данным исследований, с середины 70-х гг. XX в. наблюдается интенсивное потепление климата в Северном полушарии [North American vegetation ... , 2012; IPCC, 2013]. Зафиксировано повышение температуры воздуха также на территории Сибири, которое сопровождается изменением режима увлажнения и увеличением длительности засушливых периодов [Изменения экстремальности климата ... , 2012; Пономарев, Харук, 2016].

Лесные пожары являются основным фактором, негативно влияющим на развитие лесных геосистем в Забайкалье, что обуславливает актуальность данного направления исследований. Пожары приводят к уменьшению как сырьевого потенциала лесов, так и биотического потенциала геосистем в целом, к деградации почвенного покрова и активизации негативных геоморфологических процессов (эрозии, солифлюкции и др.) [Цветков, Буряк, 2014]. В условиях сложного горного и горно-котловинного рельефа в Забайкалье пирогенный фактор приводит к трансформации лесных геосистем и образованию многообразных переменных состояний, которые трудно прогнозировать, в то время как от их стабильности зависит экологическое состояние всех ландшафтов в регионе [Евдокименко, 2008]. Таким образом, лесные пожары отрицательно сказываются на экологическом потенциале геосистем в целом, угнетая его «защитные природные функции, обеспечивающие динамическую устойчивость по отношению к разного рода негативному воздействию на ландшафты и нормальное состояние и воспроизводство населяющих данную территорию живых организмов...» [Владимиров, Фролов, Кобылкин, 2021, с. 27].

Актуальность исследования обусловлена также тем, что в качестве его объекта выбраны геосистемы Западного Забайкалья, находящиеся в бассейне оз. Байкал, которые играют важную средозащитную и средоформирующую роль для уникального пресноводного объекта.

Из всего сказанного вытекает необходимость разработки научно обоснованной системы лесозащитных мероприятий, направленных на предотвращение лесных пожаров и минимизацию негативных последствий влияния пирогенного фактора на лесные геосистемы. Первыми и основными этапами данных мероприятий являются анализ горимости различных типов лесных геосистем и оценка их противопожарного потенциала в целях выяв-

ления наиболее подверженных лесным пожарам геосистем. Попытка такой работы и ее результаты показаны на примере лесных геосистем ключевого участка Чикой-Хилокского междуречья Западного Забайкалья и отражены в настоящей статье.

Объект исследования

Территория Западного Забайкалья расположена в горно-котловинном районе Южной Сибири, в пределах центральной части бассейна оз. Байкал. Изучаемый регион находится в глубине материка Евразия, в поясе умеренных широт, что определяет резко континентальные климатические условия географического положения (высокие амплитуды годовых и суточных температур воздуха, засушливый режим увлажнения) [Предбайкалье и Забайкалье, 1965]. Горно-долинный характер рельефа территории исследования со значительным перепадом высот обуславливает высотно-поясной и экспозиционный характер дифференциации гидротермического режима, а также проявление барьерных и котловинных эффектов, что сказывается на характере распространения различных типов (гольцовых, таежных, лесостепных и степных) геосистем.

В качестве объекта исследования выбраны лесные геосистемы ключевого участка, расположенного на территории Чикой-Хилокского междуречья (площадь 1911 км²). Участок находится в пределах Селенгинского среднегорья и занимает территорию широких долин рек Чикой и Хилок, а также захватывает примыкающую к ним с востока западную часть Малханского хребта (рис. 1). Наличие широких межгорных долин предопределяет здесь своеобразный водно-термический режим (жаркое сухое лето, холодная малоснежная зима) по сравнению с прилегающим горным обрамлением, поэтому в ложе этих долин распространены сухие сосновые леса, а также степи с мелкодерновинно-злаковой и разнотравно-злаковой растительностью [Владимиров, Фролов, Кобылкин, 2021]. Данная территория характеризуется широким распространением эоловых процессов, существенно влияющих на противопожарный потенциал геосистем. На ключевом участке лесные геосистемы представлены преимущественно сосновыми и лиственничными лесами с различной долей примесей. На аллювиально-озерных и предгорных равнинах, холмисто-увалистых возвышенностях, предгорных шлейфах, где развиты почвы легкого механического состава, распространены боровые сосняки, сосновые с березой и лиственницей леса. На склонах Малханского хребта расположены горно-таежные геосистемы с преобладанием лиственничников.

Как уже отмечалось выше, климат территории Чикой-Хилокского междуречья отличается жарким и засушливым теплым периодом года (апрель – октябрь), потому в это время наблюдается наибольший уровень горимости лесов. Территория исследования характеризуется сильными ветрами (особенно весной), которые также влияют на распространение пожаров. Так, по данным метеостанции г. Кяхты, среднемесячная скорость ветра в течение апреля, мая и июня составляет более 4 м/с. Ветры преимущественно северного и северо-западного направлений. На 2018 г. среднемесячная температура января составляла $-20,8^{\circ}\text{C}$, июля – $+19,1^{\circ}\text{C}$ ¹.

¹ Данные взяты с сайта ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://meteo.ru> (дата обращения: 04.08.2021).

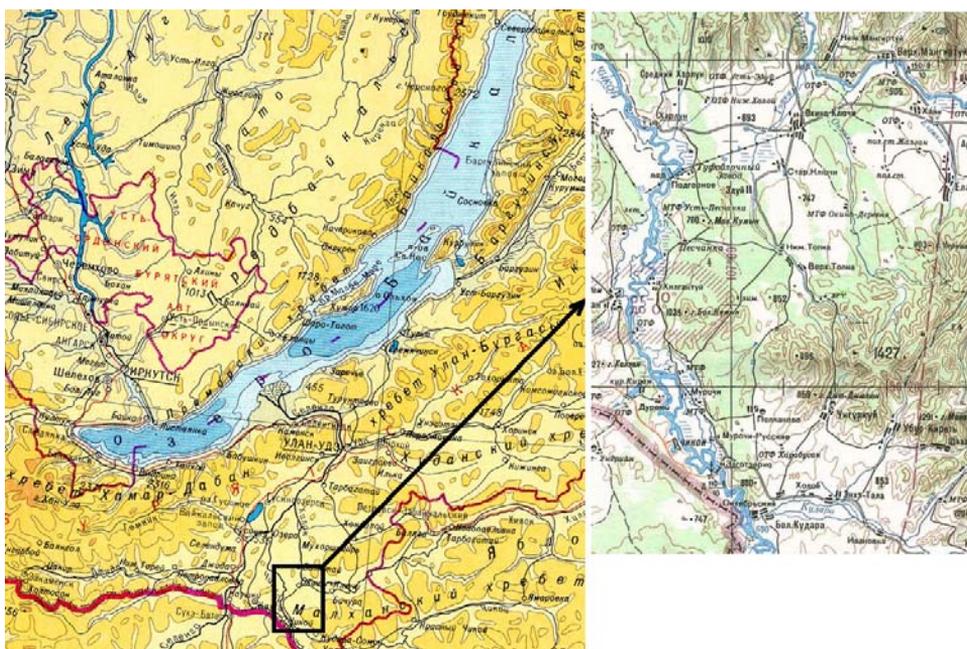


Рис. 1. Расположение ключевого участка на территории Западного Забайкалья

Материалы и методы исследования

Для оценки противопожарного потенциала и анализа горимости лесных геосистем необходимо выявить определяющие их факторы, которые могут быть как природного, так и антропогенного (связанного с деятельностью человека) характера. К критическим природным факторам относятся климатические, которые формируют фоновые метеоусловия развития геосистем и определяют риск возникновения и распространения пожаров (температурный и ветровой режим, режим осадков). Помимо фоновых климатических условий, не менее важными являются локальные внутриландшафтные особенности лесных геосистем, связанные с местоположением и определяющие режим их функционирования: рельеф, подстилающие породы и почвы, характер растительности, локальное окружение. Все эти факторы и особенности, взаимодействуя в комплексе, формируют противопожарный потенциал геосистем.

В числе важнейших условий функционирования геосистем, определяющих противопожарный потенциал и фактическую горимость лесов, водно-энергетические условия, такие как влагообмен между компонентами геосистем в системе почва – растительность – атмосферный воздух, характеризующий микро- и мезоклиматические особенности ландшафтов. Влагообмен зависит не только от количества осадков и влажности почвы, что во многом определяется климатическими фоновыми факторами и геоморфологическими особенностями местоположения, но и от характера растительности (типа и породного состава древостоя), от ее способности вовлекать определенный объем воды во влагообмен путем перехвата осадков растительным покровом.

вом, транспирации и физического испарения, формируя тем самым водно-тепловой режим геосистем.

Связь водного и теплового режимов геосистем в контексте сказанного выше можно описать уравнением теплового баланса суши, предложенным М. И. Будыко [1977]: $R = LE + P$, где R – радиационный поток тепла, LE – затрата тепла на испарение (или выделение тепла при конденсации) (L – скрытая теплота испарения, E – скорость испарения), P – турбулентный поток явного тепла от подстилающей поверхности к атмосфере. Величина LE , или поток скрытого тепла, напрямую зависит от величины влагообмена (транспирация и физическое испарение) растительного покрова с атмосферой в лесных геосистемах, причем эта величина во многом определяется породным составом древостоя [Медведков, Котова, 2020]. Из уравнения теплового баланса следует, что чем больше поток скрытого тепла, т. е. чем выше роль лесных геосистем в водоэнергетическом обмене, тем ниже интенсивность турбулентного потока явного тепла P , а следовательно, тем ниже значение приповерхностных температур лесных массивов. Лесные геосистемы с высоким противопожарным потенциалом отличаются более высоким потенциалом влагообмена и наименьшими значениями приповерхностных температур. Данная закономерность учитывалась при оценке транспирационного и противопожарного потенциалов разных типов леса на основе анализа тепловых инфракрасных космических снимков в форме термических характеристик земной поверхности для территорий Среднеенсейской Сибири и Прибайкалья [Медведков, 2018; Медведков, Котова, 2020].

В нашей работе для оценки противопожарного потенциала и горимости лесных геосистем за основу бралась электронная ландшафтно-геоморфологическая карта на ключевой участок Чикой-Хилокского междуречья, разработанная ранее с привлечением данных полевых исследований территории [Кобылкин, Выркин, Фролов, 2019]. В легенде карты отражены геоморфологические особенности геосистем (рельеф, характер подстилающих пород), почвы и растительность. Карта дает представление об особенностях местоположения геосистем, определяющих режим их функционирования и противопожарный потенциал.

Для оценки противопожарного потенциала геосистем использовался летний дневной безоблачный космический снимок Landsat 8 OLI и TIRS (дата съемки 15.06.2020). С целью получения приповерхностных температур территории применялся дальний инфракрасный спектральный канал (канал 10; 10,3–11,3 мкм). Операции проводились в программе QGIS с использованием плагина Land Surface Temperature (LST). К полученному LST-изображению применялась атмосферная коррекция с учетом погоды на день съемки. В итоге строилось индексное температурное изображение земной поверхности, отражающее интенсивность турбулентных потоков явного тепла, исходящих от геосистем территории исследования. Чтобы подтвердить вывод о высоком влагообменном и, соответственно, противопожарном потенциале лесных геосистем с низкими значениями приповерхностных температур строилось индексное изображение NDMI (Normalized difference

moisture index – нормализованный разностный индекс влажности). Данный индекс чувствителен к уровню влажности в растительности и применяется для отслеживания засух и уровня горючих материалов в пожароопасных районах. Для расчета индекса используются значения спектральной яркости в ближней инфракрасной и средней инфракрасной зонах спектра²: $NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$, где NIR – отражение в ближней инфракрасной области (канал 5; 0,845–0,885 мкм), SWIR – отражение в средней инфракрасной области спектра (канал 6; 1,560–1,660 мкм).

В дальнейшем на индексные изображения LST и NDMI накладывалась сетка ландшафтных выделов ландшафтно-геоморфологической карты для выявления примерных средних температурных значений и индексов влажности, характерных для каждого типа геосистем (рис. 2). Затем проводилась сравнительная экспертная оценка противопожарного потенциала разных типов лесных геосистем по балльной шкале: 5 – высокий ... 1 – низкий потенциал.

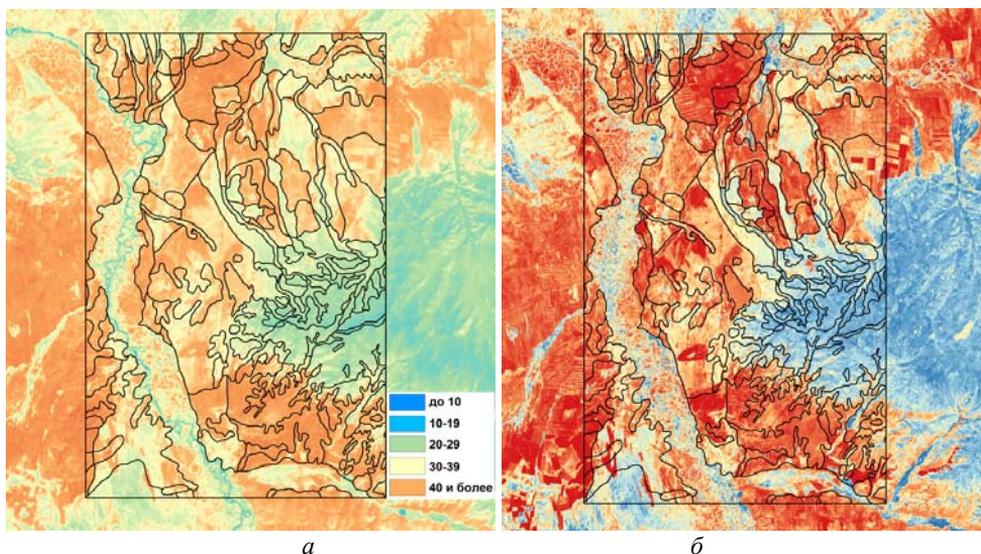


Рис. 2. Индексные изображения приповерхностных температур LST (°C) (а) и влажности NDMI (б) с нанесенной на них сеткой выделов ландшафтно-геоморфологической карты

Анализ горимости осуществлялся на основе временного ряда космических снимков Landsat 1–5 MSS, 4–5 TM, 7 ETM+, 8 OLI, полученных в разные годы с 1977 по 2020-й. Применялись снимки, полученные в теплый пожароопасный период года (с апреля по сентябрь). Анализ производился методом визуального дешифрирования свежих гарей на синтезированных

² NDMI. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/ndmi.htm> (дата обращения: 20.08.2021).

RGB-изображениях снимков в различных комбинациях каналов, оптимально идентифицирующих площади, границы и конфигурацию гарей.

Результаты исследований

Совместный анализ индексных изображений, характеризующих приповерхностные температуры (LST) и влажность (NDMI), с результатами оценки горимости лесных геосистем за последние полвека и с ландшафтно-геоморфологической картой позволил дифференцировать различные типы геосистем по их противопожарному потенциалу (рис. 3, таблица).

По результатам оценки наиболее высоким противопожарным потенциалом отличаются горно-таежные геосистемы Малханского хребта на водоразделах и склонах преимущественно северных экспозиций. Данные геосистемы отличаются относительно низкими значениями приповерхностных температур и высокими значениями индекса влажности NDMI. Высокий влагообменный, а следовательно, и противопожарный потенциал здесь можно объяснить не только условиями местоположения (значительная высота над уровнем моря, северные наветренные склоны), но и тем, что основной лесообразующей породой здесь является лиственница, которая отличается большей интенсивностью транспирации (0,06–0,54 г/(г в час)) по сравнению с минимальными значениями транспирации сосны обыкновенной – до 0,01 г/(г в час) [Касьянова, 2004]. Также высоким противопожарным потенциалом обладают геосистемы склонов речных долин и днищ падей, приуроченных к горному хребту, в которых аккумулируется свободная влага с окружающих территорий. В этих геосистемах превалирует березовый древостой и кустарники (ива, черемуха, смородина) с крупнотравьем, которые отличаются высокой интенсивностью транспирации. Средний уровень противопожарного потенциала характерен для горно-таежных геосистем склонов преимущественно южных экспозиций, холмисто-увалистых возвышенностей, приуроченных к предгорьям северного макросклона хребта, лесных геосистем предгорных шлейфов. Данные геосистемы развиваются в условиях относительного дефицита влаги, поэтому здесь преобладает неприхотливый к условиям увлажнения сосново-березовый и березово-сосновый древостой. Большим недостатком влаги, более высокими значениями приповерхностных температур, а значит, и меньшим противопожарным потенциалом отличаются лесные геосистемы на холмисто-увалистых возвышенностях, приуроченных к предгорьям южного макросклона хребта, на аллювиально-озерных равнинах, а также на широких долинах крупных рек, где преобладают кустарниковые заросли с тополем и сосной в сочетании с песчаными и песчано-галечными пляжами. Наиболее низкими значениями противопожарного потенциала характеризуются сосновые с березой разнотравные, местами мертвопокровные леса на предгорных равнинах, сложенных эоловыми и делювиально-пролювиальными отложениями (пески, лёссовидные супеси) на песчаных борových почвах (см. рис. 3, таблица).

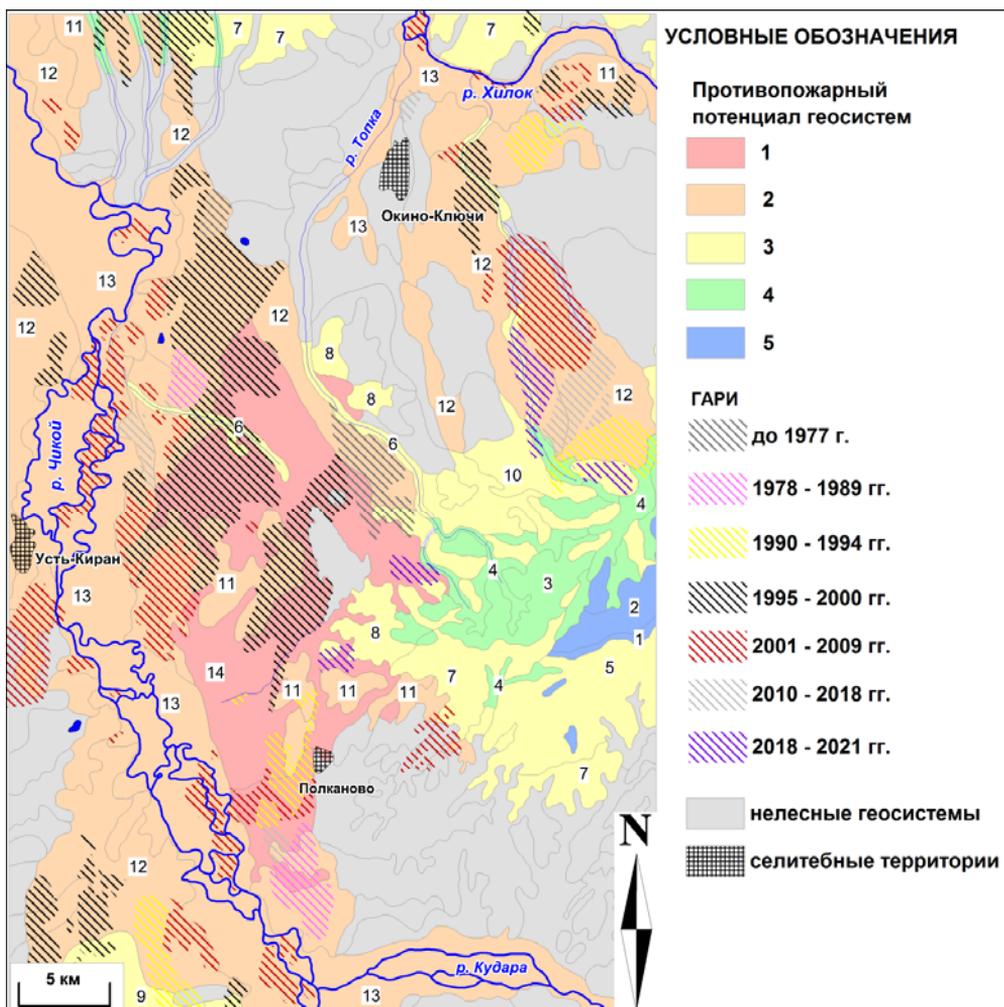


Рис. 3. Карта противопожарного потенциала и горимости лесных геосистем территории Чикой-Хилокского междуречья. Числовыми индексами на карте показаны номера типов лесных геосистем (см. таблицу). 1–5 – балл противопожарного потенциала: 1 – низкий... 5 – высокий потенциал

Совместный анализ индексных изображений с ландшафтно-геоморфологической картой показал, что уровень противопожарного потенциала лесных геосистем зависит не только от рельефа местности и характера растительности, но и от состава подстилающих пород и почв. Наименьший уровень противопожарного потенциала характерен для лесных геосистем, развитых на четвертичных отложениях и почвах легкого механического состава (пески, супеси), что связано с их низкой способностью длительное время удерживать воду. В результате этого существует дефицит влаги в геосистемах, который усугубляется в пожароопасные периоды года.

Таблица

Противопожарный потенциал лесных геосистем территории
Чикой-Хилокского междуречья

№	Тип лесных геосистем	Примерные значения при-поверхностных температур, °С	Противопожарный потенциал, баллы
1	Сосново-лиственничные с осиной и березой травяно-моховые леса на плоских водоразделах, сложенных элювиальными отложениями (глыбы, щебень, дресва, суглинки) нерасчлененными на подзолистых почвах	~15–20	5
2	Березово-лиственничные травяно-моховые кустарниковые (душекия) леса на склонах среднегорных хребтов преимущественно северных экспозиций, интенсивно расчлененных глубинной эрозией, сложенных делювиальными и коллювиально-делювиальными отложениями (суглинки с дресвой, щебнем и глыбами) нерасчлененными на подбурах и дерново-лесных почвах	~15–20	5
3	Сосново-березово-лиственничные с рододендроном даурским травяно-мохово-брусничные леса на склонах средне- и низкогорий преимущественно северных экспозиций, сложенных делювиальными отложениями (суглинки со щебнем и дресвой) нерасчлененными на дерново-лесных почвах	~18–25	4
4	Лиственнично-березовые с сосной кустарниковые (ива, ольха, черемуха) разнотравно-крупнотравные леса на склонах речных долин и днищах падей, приуроченных к хребту, на аллювиально-пролювиальных и аллювиально-делювиальных отложениях (пески, супеси с гравием, галькой, суглинки с дресвой и щебнем) на серых лесных почвах	~18–23	4
5	Березово-сосновые кустарничково-травяные леса на склонах среднегорных хребтов преимущественно южных экспозиций, интенсивно расчлененных глубинной эрозией, сложенных делювиальными и коллювиально-делювиальными отложениями (суглинки с дресвой, щебнем и глыбами) нерасчлененными на дерново-лесных почвах	~20–30	3
6	Сосново-березовые кустарниковые (ива, черемуха) разнотравные леса на склонах речных долин и днищах падей, приуроченных к равнине, на аллювиально-пролювиальных и аллювиально-делювиальных отложениях (пески, супеси с гравием, галькой, суглинки с дресвой и щебнем) на серых лесных почвах	~20–30	3
7	Березово-сосновые травянистые леса на склонах средне- и низкогорий преимущественно южных экспозиций, сложенных делювиальными отложениями (суглинки со щебнем и дресвой) нерасчлененными на дерново-лесных почвах	~20–30	3

Окончание табл.

№	Тип лесных геосистем	Примерные значения при- поверхностных температур, °С	Противо- пожарный потенци- ал, баллы
8	Лиственнично-сосново-березовые и сосново-березовые с кустарником (шиповник, рододендрон) травяные леса на холмисто-увалистых возвышенностях, приуроченных к предгорьям северного макросклона хребта, сложенных эоловыми и делювиальными отложениями (супеси, пески с щебнем и дресвой) нерасчлененными на легких дерново-лесных почвах	~20–30	3
9	Березово-сосновые разнотравные с кустарником (рододендрон, спирея) леса на предгорных шлейфах и конусах выноса, сложенных делювиально-пролювиальными (суглинки, супеси с дресвой и щебнем) отложениями на дерново-лесных почвах	~20–30	3
10	Сосново-березовые разнотравные леса на эрозивно-аккумулятивных террасовалах, сложенных аллювиально-озерными отложениями (алевриты, охристые суглинистые песчано-гравийные отложения с прослоями суглинков и глин) на серых лесных и дерново-лесных почвах	~20–30	3
11	Сосновые и березово-сосновые с кустарником (шиповник, рододендрон) разнотравные леса на холмисто-увалистых возвышенностях, приуроченных к предгорьям южного макросклона хребта, сложенных эоловыми и делювиальными отложениями (супеси, пески с щебнем и дресвой) нерасчлененными на легких дерново-серых почвах	~30–40	2
12	Березово-сосновые разнотравные кустарниковые (рододендрон, шиповник, спирея) леса и лесостепи на аллювиально-озерных равнинах, сложенных аллювиально-озерными отложениями (пески мелкозернистые, алевролитовые, с прослоями гальки, гравия) на серых лесных почвах	~28–38	2
13	Кустарниковые (ива) заросли с тополем и сосной в сочетании с луговыми и лугово-болотными территориями с участками песчаных и песчано-галечных пляжей на поймах и низких (первых надпойменных) речных террасах, сложенных аллювиальными отложениями (пески, галечники, гравий, супеси, илы) на аллювиальных луговых серо- и темногумусовых и лугово-болотных перегнойно-глеевых почвах	~20–40	2
14	Сосновые с березой кустарниковые (рододендрон, душекия, шиповник, спирея) разнотравные, местами мертвопокровные леса на предгорной полигенетической равнине, переработанной эоловыми и другими экзогенными процессами, сложенной эоловыми и делювиально-пролювиальными покровными отложениями (пески, лёссовидные супеси с дресвой и щебнем, алевриты) на песчаных борových почвах	~ 30–40 и выше	1

Достоверность результатов оценки противопожарного потенциала геосистем, осуществимой на основе индексных изображений и ландшафтно-геоморфологической карты, подтверждается анализом фактической горимости лесов, проведенным за последние примерно 50 лет. Анализ разновременных космических снимков Landsat продемонстрировал, что на исследуемой территории в границах картографируемого участка (см. рис. 3) за последние полвека пожарами затронуто около 420 из 1911 км² картографируемой территории, т. е. порядка 22 % площади. Максимальный ущерб от пожаров нанесен в период с 2000 по 2009 г., когда площадь гари увеличилась на 303 км². В этот период в Забайкалье наблюдались крайне засушливые весенне-летние сезоны, отмеченные во многих работах по лесной пирологии [Евдокименко, 2008; Последствия лесных ... , 2016; Борисова, 2017]. Наибольший вред от пожаров, выраженный в площади и количестве гарей, причинен сухим сосновым и березово-сосновым лесам на аллювиально-озерных, делювиально-пролювиальных и эоловых отложениях легкого механического состава.

Заключение

В работе на ландшафтно-геоморфологической основе с использованием ГИС-технологий показана оценка противопожарного потенциала различных типов лесных геосистем на территорию Чикой-Хилокского междуречья (Западное Забайкалье). Основой оценки послужил анализ локальных особенностей (условий, факторов) геосистем, обуславливаемых их местоположением (рельеф, подстилающие породы и почвы) и характером растительности, которые определяют функционирование ландшафтов, в том числе водоэнергетический обмен между их компонентами и геосистемой и средой в целом. Водообменный потенциал лесных геосистем напрямую связан с их противопожарной устойчивостью: чем больше влаги вовлечено в оборот в системе почва – растительность – атмосферный воздух, тем выше противопожарный потенциал ландшафтов. В качестве индикаторов уровня влагообменного потенциала геосистем послужили индексные изображения, характеризующие приповерхностные температуры и влажность, полученные с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Совместный анализ индексных изображений и ландшафтно-геоморфологической карты показал, что наименьшим уровнем противопожарного потенциала обладают геосистемы сосновых лесов, развитых на четвертичных отложениях и почвах легкого механического состава, что предполагает создание особого режима их использования и охраны. Достоверность оценки противопожарного потенциала подтвердилась анализом фактической горимости лесов за последние полвека, проведенным на основе временного ряда космических снимков.

Таким образом, при оценке противопожарного потенциала учитывались геофизические показатели, характеризующие влагообменный потенциал лесных геосистем и регистрируемые с помощью методов дистанционного зондирования Земли. При этом в данной работе не стояли задачи учета всех факторов и условий, влияющих на противопожарную устойчивость и горимость лесов (характер лесных горючих материалов, вклад антропогенного

фактора, влияние неблагоприятных метеоусловий и др.). Постановка и решение такого рода задач может быть следующим этапом в изучении влияния пирогенного фактора на развитие геосистем территории Забайкалья.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4).

Список литературы

- Борисова Т. А.* Лесные пожары Бурятии: причины и следствия // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 2. С. 78–84.
- Будыко М. И.* Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.
- Владимиров И. Н., Фролов А. А., Кобылкин Д. В.* Экологический потенциал геосистем на границе леса и степи (бассейн озера Байкал) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 36. С. 26–44. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.202136.26>
- Евдокименко М. Д.* Пирогенная дигрессия светлохвойных лесов Забайкалья // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 109–115.
- Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО / И. М. Школьник, В. П. Мелешко, С. В. Ефимов, Е. Н. Стафеева // Метеорология и гидрология. 2012. № 2. С. 5–23.
- Касьянова Л. Н.* Экология растений Прибайкалья (водный обмен). М.: Наука, 2004. 288 с.
- Кобылкин Д. В., Выркин В. Б., Фролов А. А.* Развитие ландшафтов песчаных массивов западной части Малханского хребта (Западное Забайкалье) // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2019. № 4. С. 41–54. <https://doi.org/10.18101/2587-7148-2019-4-41-54>
- Медведков А. А.* Подходы к оценке противопожарной функции лесных ландшафтов в условиях бореальной криолитозоны // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата (ГЕОРИСК-2018). М.: РУДН, 2018. Т. 2. С. 209–213.
- Медведков А. А., Котова М. В.* Противопожарный потенциал лесов водоохранной зоны озера Байкал (на примере территории Байкало-Ленского заповедника) // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84, № 5. С. 764–775. <https://doi.org/10.31857/S2587556620050118>
- Пономарев Е. И., Харук В. И.* Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологический журнал. 2016. № 1. С. 38–46.
- Последствия лесных пожаров в южных и центральных районах Забайкальского края / Л. В. Буряк, Е. А. Кукавская, О. П. Каленская, О. Ф. Малых, Е. О. Бакшеева // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 94–102.
- Предбайкалье и Забайкалье / отв. ред. В. С. Преображенский. М.: Наука, 1965. 492 с.
- Цветков П. А., Буряк Л. В.* Исследования природы пожаров в лесах Сибири // Сибирский лесной журнал. 2014. № 3. С. 25–42.
- A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes / W. J. de Groot, A. S. Cantin, M. D. Flannigan, A. J. Soja, L. M. Gowman, A. Newbery // For. Ecol. Manag. 2013. Vol. 294. P. 23–34.
- Alaska's changing fire regime – implications for the vulnerability of its boreal forests / E. S. Kasischke, D. L. Verbyla, T. S. Rupp, A. D. McGuire, K. A. Murphy, R. Jandt, J. L. Barnes, E. E. Hoy, P. A. Duffy, M. Calef, M. R. Turetsky // Can. J. For. Res., 2010. Vol. 40, N 7. P. 1313–1324.

Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia / M. Forkel, K. Thonicke, C. Beer, W. Cramer, S. Bartalev, C. Schmullius // *Environ. Res. Lett.* 2012. Vol. 7, N 4. P. 1–9.

Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest/ M. Flannigan, B. Stocks, M. Turetsky, M. Wotton // *Glob. Change Biol.* 2009. Vol. 15, Iss. 3. P. 549–560.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. 203 p.

Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Wildfires dynamic in the larch dominance zone // *Geophys. Res. Lett.*, 2008. Vol. 35, Iss. 1. P. 1–6.

Large wildfire trends in the western United States, 1984–2011 / P. E. Dennison, S. C. Brewer, J. D. Arnold, M. A. Moritz // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41, Iss. 8. P. 2928–2933.

North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems / G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, C. Sáenz-Romero, E. M. Campbell // *Ecol. Appl.* 2012. Vol. 22, Iss. 1. P. 119–141.

Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson K. J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests // *Forests*. 2016. Vol. 7, Iss. 6. 125. P. 1–9. <https://doi.org/10.3390/f7060125>

Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels / E. A. Loupian, A. A. Mazurov, E. V. Flitman, D. V. Ershov, G. N. Korovin, V. P. Novik, N. A. Abushenko, D. A. Altyntsev, V. V. Koshelev, S. A. Tashchilin, A. V. Tatarnikov, I. Csizsar, A. I. Sukhinin, E. I. Ponomarev, S. V. Afonin, V. V. Belov, G. G. Matvienko, T. Loboda // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. Vol. 11, Iss. 1. P. 113–145.

Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Climate change and wildfires in Russia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2013. Vol. 6, Iss. 7. P. 683–692.

Fire-fighting Potential and Burnability of Forest Geosystems of Western Transbaikalia (on the Example of the Chikoy-Khilok Interfluve)

A. A. Frolov

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. In this work, on the basis of a landscape map and satellite images from the Landsat satellite, an assessment of the fire-fighting potential of forest geosystems in the territory of the Chikoy-Khilok interfluve (Western Transbaikalia) was carried out. The basis for assessing the fire-fighting potential of forest geosystems was the analysis of the level of water exchange between the components of geosystems, which characterizes the micro- and mesoclimatic features of landscapes. In order to assess the moisture exchange potential of forest geosystems, a joint analysis of index images reflecting the temperature and humidity of the vegetation cover of landscapes was carried out. These images are calculated based on the infrared channels of the Landsat 8 OLI and TIRS satellite images. Forest geosystems with a high potential for moisture exchange have low temperatures of vegetation cover and high fire resistance. The joint analysis of the index images and the landscape map made it possible to carry out an expert assessment of the fire resistance of various types of forest geosystems on a scale of 1 to 5 points. On the territory of the study, the lowest level of fire-fighting potential is distinguished by the geosystems of dry pine and birch-pine forests on plains and foothill heights composed of Quaternary deposits of light texture (sands, sandy loam). Based on the time series of space

images of the Landsat, obtained in different years from 1977 to 2020, an analysis of the actual burning of forests has been carried out. This analysis confirmed the high degree of reliability of the assessment of the fire-fighting potential of the forests of the Chikoy-Khilok interfluvium area.

Keywords: fire-fighting potential of geosystems, forest burnability, remote sensing data, landscape-geomorphological map, Western Transbaikalia.

For citation: Frolov A. A. Geosystems of Western Transbaikalia (on the Example of the Chikoy-Khilok Interfluvium). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 38, pp. 100-114. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.100> (in Russian)

References

Borisova T.A. Lesnye pozhary Buryatii: prichiny i sledstviya [Forest fires in Buryatia: causes and consequences]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series Geography. Geoecology], 2017, no. 2, pp. 78-84. (in Russian)

Budyko M.I. *Globalnaya ekologiya* [Global ecology]. Moscow, Mysl Publ., 1977, 327 p. (in Russian)

Vladimirov I.N., Frolov A.A., Kobylkin D.V. Ekologicheskii potentsial geosistem na granitse lesa i stepi (bassein ozera Baikal) [Ecological potential of geosystems on the boundary of forest and steppe (Lake Baikal drainage basin)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2021, vol. 36, pp. 26-44. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.202136.26> (in Russian)

Evdokimenko M.D. Pirogennaya digressiya svetlokhvoinykh lesov Zabaikaliya [Pyrogenic digression of light coniferous forests of Transbaikalia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2008, no. 2, pp. 109-115. (in Russian)

Shkol'nik I.M., Meleshko V.P., Efimov S.V., Stafeyeva E.N. Izmeneniya ekstremalnosti klimata na territorii Sibiri k seredine XXI veka: ansamblevyy prognoz po regionalnoi modeli GGO [Changes in the climate extremity in Siberia by the middle of the XXI century: an ensemble forecast based on the regional model of the MGO]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2012, no. 2, pp. 5-23. (in Russian)

Kas'yanova L.N. *Ekologiya rastenii Pribaikaliya (vodnyi obmen)* [Plant ecology of the Baikal region (water exchange)]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 288 p. (in Russian)

Kobylkin D.V., Vyrkin V.B., Frolov A.A. Razvitie landshaftov peschanykh massivov zapadnoi chasti Malkhanskogo khrebt (Zapadnoe Zabaikalie) [Development of landscapes of sand massifs in the western part of the Malkhansky ridge (Western Transbaikalia)]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, geografiya* [Bulletin of the Buryat State University. Biology, geography], 2019, no. 4, pp. 41-54. <https://doi.org/10.18101/2587-7148-2019-4-41-54> (in Russian)

Medvedkov A.A. Podkhody k otsenke protivopozharnoi funktsii lesnykh landshaftov v usloviyakh boreal'noi kriolitozony [Approaches to assessing the fire-fighting function of forest landscapes in the conditions of the boreal permafrost zone]. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami s uchetom globalnogo izmeneniya klimata (GEORISK-2018)* [Analysis, forecast and management of natural risks taking into account global climate change (GEORISK-2018)], 2018, vol. 2, pp. 209-213. (in Russian)

Medvedkov A.A., Kotova M.V. Protivopozharnyy potentsial lesov vodookhrannoi zony ozera Baikal (na primere territorii Baikalo-Lenskogo zapovednika) [Fire-fighting potential of forests in the water protection zone of Lake Baikal (on the example of the territory of the Baikalo-Lensky nature reserve)]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Izvestiya RAS. Geographic series], 2020, vol. 84, no. 5, pp. 764-775. <https://doi.org/10.31857/S2587556620050118> (in Russian)

Ponomarev E.I., Kharuk V.I. Gorimost' lesov Altae-Sayanskogo regiona v usloviyakh nablyudaemykh izmenenii klimata [Fire rate of forests in the Altai-Sayan region under the conditions of observed climate changes]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Siberian ecological journal], 2016, no. 1, pp. 38-46. (in Russian)

Buryak L.V., Kukavskaya E.A., Kalenskaya O.P., Malykh O.F., Baksheeva E.O. Posledstviya lesnykh pozharov v yuzhnykh i tsentral'nykh raionakh Zabaikal'skogo kraya [Consequences of forest fires in the southern and central regions of the Trans-Baikal Territory]. *Sibirskii lesnoi zhurnal* [Siberian forest journal], 2016, no. 6, pp. 94-102. (in Russian)

Predbaikalie i Zabaikalie [Cisbaikal and Transbaikalia]. V.S. Preobrazhenskii (eds.). Moscow, Nauka Publ., 1965, 492 p. (in Russian)

Tsvetkov P.A., Buryak L.V. Issledovaniya prirody pozharov v lesakh Sibiri [Studies of the nature of fires in the forests of Siberia]. *Sibirskii lesnoi zhurnal* [Siberian forest journal], 2014, no. 3, pp. 25-42. (in Russian)

Groot de W.J., Cantin A.S., Flannigan M.D., Soja A.J., Gowman L.M., Newbery A.A. comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes. *For. Ecol. Manag.*, 2013, vol. 294, pp. 23-34.

Kasischke E.S., Verbyla D.L., Rupp T.S., McGuire A.D., Murphy K.A., Jandt R., Barnes J.L., Hoy E.E., Duffy P.A., Calef M., Turetsky M.R. Alaska's changing fire regime – implications for the vulnerability of its boreal forests. *Can. J. For. Res.*, 2010, vol. 40, no. 7, pp. 1313-1324.

Forkel M., Thonicke K., Beer C., Cramer W., Bartalev S., Schmullius C. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia. *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, no. 4, pp. 1-9.

Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Glob. Change Biol.*, 2009, vol. 15, iss. 3, pp. 549-560.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 203 p.

Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Wildfires dynamic in the larch dominance zone. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. 35, iss. 1, pp. 1-6.

Dennison P.E., Brewer S.C., Arnold J.D., Moritz M.A. Large wildfire trends in the western United States, 1984-2011. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, iss. 8, pp. 2928-2933.

Rehfeldt G.E., Crookston N.L., Sáenz-Romero C., Campbell E.M. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecol. Appl.*, 2012, vol. 22, iss. 1, pp. 119-141.

Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ranson K.J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests. *Forests*, 2016, vol. 7, iss. 6. 125. pp. 1-9. <https://doi.org/10.3390/f7060125>

Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csizsar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, vol. 11, iss. 1, pp. 113-145.

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Climate change and wildfires in Russia. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2013, vol. 6, iss. 7, pp. 683-692.

Фролов Александр Андреевич
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
e-mail: f-v1984@mail.ru

Frolov Alexandr Andreevich
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Researcher
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: f-v1984@mail.ru

Код научной специальности: 25.00.23

Дата поступления: 07.09.2021

Известия Иркутского государственного университета
Серия «Науки о Земле». 2021. Т. 38. С. 100–114