УДК 911.52 DOI: 10.15372/GIPR20230406

А.А. ФРОЛОВ, Д.А. БЫСТРОВА

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, f-v1984@mail.ru, da.bystrova@mail.ru

ЛАНДШАФТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ГОРИМОСТИ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ ЮГА СЕЛЕНГИНСКОГО СРЕДНЕГОРЬЯ

Показаны принципы ландшафтного анализа территории и продемонстрирован опыт поэтапной реализации этих принципов (функционального, комплексного, динамического, классификационно-иерархического, дискретного) для оценки противопожарной устойчивости лесных геосистем юга Селенгинского среднегорья. Практическое выражение поэтапной реализации данных принципов заключается в анализе ландшафтообразующих факторов и условий, в выборе комплексных показателей функционирования геосистем, в создании ландшафтно-информационной основы оценки, в совместном анализе полученных данных комплексных показателей и ландшафтно-типологической карты с последующей оценкой противопожарной устойчивости разных типов лесных геосистем. В рамках указанной программы исследований проанализированы внутриландшафтные условия и особенности лесных геосистем (рельеф, характер подстилающих пород и почв, растительность), определяющие их противопожарную устойчивость, и построена ландшафтно-информационная основа (ландшафтно-типологическая карта) лесных геосистем. В качестве комплексного показателя выбрана величина приповерхностной температуры, которая характеризует уровень влагообмена между компонентами геосистем, определяющего микро- и мезоклиматические особенности ландшафтов. С целью определения влагообменного потенциала проведен совместный анализ индексных изображений, характеризующих приповерхностные температуры (LST) и влажность (NDMI), которые рассчитаны на базе инфракрасных каналов космических снимков Landsat 8 OLI и TIRS. Лесные геосистемы с высокой противопожарной устойчивостью отличаются более высоким уровнем влагообмена и минимальными значениями приповерхностных температур. Далее выполнен совместный анализ полученных результатов методом наложения данных: на индексные изображения LST и NDMI наложена сетка ландшафтных выделов карты для выявления модальных значений приповерхностной температуры, характерной для каждого типа геосистем. На основе полученных данных проведена экспертная оценка и построена карта противопожарной устойчивости разных типов лесных геосистем. Выявлено, что минимальный уровень противопожарной устойчивости характерен для сосновых остепненных, местами мертвопокровных, лесов на равнинах и предгорных возвышенностях, сложенных эоловыми и делювиально-пролювиальными отложениями на почвах легкого механического состава. Достоверность результатов оценки противопожарной устойчивости геосистем подтверждена анализом фактической горимости лесов, проведенным на основе временного ряда космических снимков Landsat за последние 50 лет, когда пожарами было затронуто примерно 51 % площади всех лесов исследуемой территории.

Ключевые слова: *ландшафтная карта, компоненты геосистем, влагообменный потенциал, космические снимки, комплексный показатель, приповерхностные температуры.*

A.A. FROLOV, D.A. BYSTROVA

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, f-v1984@mail.ru, da.bystrova@mail.ru

LANDSCAPE ANALYSIS OF FIRE RESISTANCE AND FIRE FREQUENCY INDEX OF FOREST GEOSYSTEMS IN THE SOUTH OF THE SELENGA MIDDLE MOUNTAINS

We present the principles of landscape analysis of a territory and demonstrate the experience of implementing these principles on a step-by-step basis (functional, complex, dynamic, classification-hierarchical, and discrete) was demonstrated for assessing the fire resistance of forest geosystems in the south of the Selenga middle mountains. The practical expression of the step-by-step implementation of these principles involves analyzing the landscape-forming factors and conditions, selecting complex indicators of the functioning of geosystems, creating a landscape-information basis for assessment, and carrying out a correlated analysis of the resulting complex indicators and the landscape-typological map, followed by an assessment of fire resistance of different types of forest geosystems. Within the framework of this research program, intra-landscape conditions and features of forest geosystems (relief, nature of underlying rocks and soils, and vegetation) were analyzed, determining their fire resistance, and a landscape-information basis (landscape-typological map) of forest geosystems was built. The value of the near-surface temperature that characterizes the level of moisture exchange between the components of geosystems, which determines the micro-

© 2023 Фролов А.А., Быстрова Д.А.

and mesoclimatic features of landscapes, is used as a complex indicator. To determine the moisture exchange potential, a correlative analysis of index images characterizing land surface temperatures (LST) and moisture (normalized difference moisture index, NDMI) was carried out, which were calculated on the basis of infrared channels of Landsat 8 OLI and TIRS satellite images. Forest geosystems with high fire resistance are characterized by a higher level of moisture exchange and by minimum values of LST. Further, a correlative analysis of results obtained by the data overlay method was carried out: a grid of landscape map selections was superimposed on the LST and NDMI index images to identify modal values of the land surface temperature characteristic of each type of geosystems. It was found that the minimum level of fire resistance is characteristic of pine forests of steppizated, sometimes dead-cover, forests on plains and foothill elevations, composed of aeolian and deluvial-proluvial deposits on soils of light mechanical composition. The reliability of the results from assessing the fire resistance of geosystems is confirmed by the analysis of the actual fire frequency index of forests conducted on the basis of a time series of Landsat satellite images over the past 50 years when fires affected approximately 51 % of the area of all forests of the study area.

Keywords: *landscape map, components of geosystems, moisture exchange potential, satellite images, complex indicator, land surface temperatures.*

ВВЕДЕНИЕ

В конце XX – начале XXI в. в Северном полушарии в целом и в России в частности наблюдалась тенденция увеличения уровня горимости лесных ландшафтов, что зафиксировано во многих научных исследованиях [1–3]. При этом до 70–90 % всех лесных пожаров в России приходятся на территорию Сибири [4, 5]. В лесах Сибири фиксируется от 4,5 до 27 тыс. пожаров в год общей площадью от 3,5 до 18 млн га. Здесь за последние годы динамика горимости лесных геосистем показывает устойчивый рост количества и площади пожаров [6]. В ряде регионов Сибири, в частности в Забайкалье, экстремальная пожароопасная обстановка с начала XXI в. наблюдается регулярно. Крупные пожары на данной территории повторяются с периодом примерно в 3–5 лет, на что, вероятно, влияет изменение климатической обстановки и соответствующих ей погодных условий — повышение температуры воздуха, изменение режима увлажнения, увеличение длительности засушливых периодов с высокой температурой воздуха, отсутствие или неравномерное перераспределение осадков в течение года [7, 8]. Сложное положение складывается и на юге Селенгинского среднегорья в Забайкалье, где ситуация осложняется специфическими природно-климатическими условиями (жаркий засушливый климат в теплый пожароопасный период года, частые и продолжительные ветра, горно-котловинный характер рельефа, преобладание чувствительных к пожарам сосновых и лиственничных древостоев в геосистемах), усиливающими воздействие пирогенного фактора на развитие лесных геосистем, что обусловливает актуальность данного направления исследований.

Помимо макроклиматических факторов на уровень противопожарной устойчивости (ПУ) и горимости лесов влияют внутриландшафтные природные факторы и процессы, определяющие компоненты лесных геосистем (водный и воздушный компоненты, геолого-геоморфологическая основа, почва, биота) и их взаимодействие через вещественно-энергетический обмен, которое обусловливает функционирование геосистем, их природный режим. Именно от совместного действия комплекса этих факторов зависит ПУ различных типов лесных геосистем, т. е. степень их устойчивости к возгораниям и распространению огня. Так, близкое по смыслу определение «природная пожарная опасность лесов» во многом определяется внутренними факторами: типом леса, характером лесных горючих материалов и содержанием влаги в них, почвенно-гидрологическими условиями и др. [9].

Исходя из сказанного, при оценке ПУ лесов целесообразно применять ландшафтный подход (ландшафтный анализ) [10, 11], подразумевающий изучение лесных территорий как природно-территориальных комплексов (геосистем, ландшафтов) с вытекающим из этого анализом ландшафтообразующих факторов и процессов, определяющих формирование ландшафтной структуры территории, состоящей из разных геосистем (различных состояний геосистем) со своими особенностями функционирования, природным режимом и, как следствие, определенной ПУ.

Таким образом, для формирования в перспективе научно обоснованной системы лесозащитных мероприятий ландшафтов, направленных на предотвращение лесных пожаров и минимизацию их негативных последствий, возникает необходимость анализа горимости различных типов лесных геосистем и оценки их ПУ с целью выявления наиболее подверженных лесным пожарам геосистем. В данной работе продемонстрирован опыт реализации принципов ландшафтного анализа для исследования и оценки ПУ и горимости лесных геосистем юга Селенгинского среднегорья.

ПРИНЦИПЫ ЛАНДШАФТНОГО АНАЛИЗА

При ландшафтном анализе необходимо учитывать основные закономерности организации территории как дискретного ландшафтного пространства, состоящего из геосистем разного иерархиче-

ского уровня и динамического состояния, компоненты которых находятся в системной взаимосвязи друг с другом, образуя определенную целостность [12]. Из данного положения можно сформулировать несколько принципов ландшафтного анализа территории.

Комплексный принцип исходит из аксиомы взаимосвязи и взаимозависимости природных компонентов ландшафта, при этом итоговым объектом и конечным результатом анализа являются не отдельные компоненты территории (почвы, растительность и др.) (отраслевой принцип), а геосистемы в целом. На это указывал В.С. Михеев, отмечая, что «реализация принципа комплексности заключается не в аналитической (покомпонентной), а синтетической форме обобщения через выявление всех таксонов ландшафтной классификации территории деятельности человека» [10, с. 185]. В рамках нашего исследования реализация данного принципа заключается в поиске и использовании комплексных показателей для оценки ПУ геосистем.

Дискретный (дифференцированный) принцип, при котором оценка разных характеристик производится не тотально по всей территории в целом во множестве мест пространства, а точечно (дифференцировано), в отдельных ее территориальных (региональных) подразделениях (геохорах) или классификационных категориях (геомерах, типах, видах, таксонах), т. е. в отдельных представительных геосистемах или их типах, характеризующих изучаемую территорию, с дальнейшей экстраполяцией результатов оценки как на всю территорию отдельных оцениваемых геосистемных выделов, так и на все геосистемы определенной типологической принадлежности. Еще А.Г. Исаченко, размышляя о ландшафтном подходе, отмечал, что «он экономнее многих искусственных приемов. Вместо того чтобы высчитывать оценочные показатели для множества точек, ... достаточно произвести оценку по региональным подразделениям или классификационным категориям геосистем (типам урочищ, видам ландшафтов и т. п.)» [13, с. 67]. Реализация этого принципа находит свое отражение в нашем исследовании при расчете комплексных показателей для каждого типа геосистем.

При **динамическом принципе** территория рассматривается как динамическая система, как пространственно-временная структура коренных и переменных состояний геосистем, сменяющих друг друга в разные промежутки времени под влиянием внешних и внутренних, природных и антропогенных факторов (серийные геосистемы, восстановительные сукцессионные стадии, антропогенные трансформации и т. д.). Данный принцип находит свое отражение при рассмотрении территории как ландшафтной структуры в ее динамическом понимании, т. е. структуры, элементы которой представляют собой геосистемы с разными динамическими состояниями, для которых свойственны свои условия, режим функционирования и определенный характер вещественно-энергетического обмена, влияющие на ПУ.

Классификационно-иерархический принцип подразумевает рассмотрение территории как совокупности взаимосвязанных геосистем различных уровней иерархии, между которыми складываются отношения соподчиненности: геосистема верхнего уровня является средой для геосистем нижнего уровня. Иерархия геосистем отражается в классификации — все геосистемы одного типа (по общим признакам) и одного иерархического уровня объединяются в таксономическую категорию более высокого порядка (уровня иерархии), образуя иерархическую ландшафтно-типологическую структуру, которая отражается в результатах ландшафтного анализа — на ландшафтных картах и легендах к ним.

Функциональный принцип подразумевает анализ ландшафтообразующих процессов и факторов, формирующих ландшафтную структуру территории. Геосистема при этом рассматривается как «функция» воздействия комплекса факторов, определяющих ее природный режим, функциональные и динамические особенности, а следовательно, и ПУ. Реализация функционального принципа осуществляется при факторально-динамическом анализе территории (факторально-динамический подход), который раскрывает все многообразие основных ландшафтообразующих процессов и факторов и объединяет их с пестрой картиной различных динамических состояний геосистем в общую факторально-динамическую систему.

Сформулированные принципы во многом перекликаются с комплексным полисистемным анализом ландшафта (региона) В.С. Михеева [10, с. 190], в основу которого он вкладывал: «1) изучение ландшафтной структуры в единой многоступенчатой классификационной системе; 2) ранговый анализ совмещения макрогеографических закономерностей (построение системы внешних взаимодействий); 3) структурно-динамический анализ ландшафта (построение системы отношений на основе интеграции элементарных природных объектов); 4) функционально-типологическая систематизация (построение отношений на основе внутренних связей и взаимодействий)».

Ландшафтный анализ, отражая закономерности организации географической среды и пространственное расположение природных комплексов, предполагает синтетическое представление о при-

роде территории. Результатом такого анализа является ландшафтная карта [10], а также, в случае прикладной целевой необходимости, производные от нее оценочные карты, отражающие результаты исследования конкретной проблемы. В нашем случае к таким картам можно отнести карты ПУ лесных геосистем.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбраны лесные геосистемы юга Селенгинского среднегорья. Горный и горно-котловинный характер рельефа, кулисное расположение хребтов, противоположное направлению господствующего над регионом северо-западного переноса воздушных масс, определяют здесь высотно-поясную и экспозиционную дифференциацию природно-климатических условий с проявлениями барьерных и котловинных эффектов, что способствует формированию различных типов ландшафтов (таежных, лесостепных и степных) [14, 15].

Территория расположена в умеренных широтах в центре азиатского материка и на большом удалении от морей и океанов, что способствует формированию здесь резко континентальных климатических условий (высокие амплитуды годовых и суточных температур воздуха, засушливый режим увлажнения) [16, 17]. В середине XX в. на территории Селенгинского среднегорья повсеместно отмечались отрицательные среднегодовые температуры воздуха — от −0,5 до −4,2 °С [16]. В 2019 г., по данным метеостанции г. Кяхты (юг Селенгинского среднегорья), среднегодовая температура воздуха составила +1,7 °С, что говорит о тенденциях потепления климата примерно за последние полвека. На 2018 г. среднемесячная температура января составляла −20,8 °С, июля — +19,1 °С [18]. Годовое количество осадков для степных территорий отмечается в пределах 200−300 мм/год, для горно-таежных ландшафтов — 350−450 мм/год. Осадки имеют сезонный характер. Основная их часть приходится на июль и август и составляет примерно 70−80 % годовой суммы [15]. Особенной засушливостью отличается весенний период (апрель−май).

Для Селенгинского среднегорья характерны ветры северных, северо-западных и западных направлений, хотя на юге среднегорья поздней весной и в первой половине лета погодные условия часто определяют сухие ветра из Монголии, приводящие к иссушению почвы и возникновению пыльных бурь [15]. Характерны весенний и осенний максимумы скоростей ветра со среднемесячными скоростями до 6 м/с [16].

Исходя из физико-географического районирования, представленного на карте «Ландшафты юга Восточной Сибири» [19], территория исследования относится к Селенгинско-Орхонской котловинно-среднегорной остепненной и Хилокско-Чикойской горно-таежно-котловинной остепненной провинциям Южно-Сибирской горной области. В межгорных понижениях и на нижних уровнях южных макросклонов хребтов в зависимости от условий увлажнения распространены степные и сухостепные геосистемы на черноземах малогумусовых и каштановых почвах. На подгорных территориях в котловинах развиты лесостепные геосистемы из березы, сосны, осины, ильма, реже лиственницы с серыми метаморфическими почвами [20]. В междуречье Селенги, Чикоя и Хилка на мощных толщах песчаных и супесчаных отложений развиты сосновые боры с псаммоземами гумусовыми [20]. В широких долинах рек распространены луга и лугово-болотные геосистемы с кустарниковыми зарослями на аллювиальных почвах. На среднегорных хребтах юга Селенгинского среднегорья развиты горно-таежные ландшафты: на южных макросклонах доминируют сосновые леса с различной долей примесей из березы и осины, а на водоразделах и северных макросклонах преобладают лиственничные и кедрово-лиственничные леса [21]. Для горно-таежных ландшафтов территории исследования характерны следующие разновидности почв: дерново-подзолистые, буроземы грубо- и темногумосовые, подбуры, дерново-подбуры [20].

Как уже отмечалось ранее, для эффективного решения задач исследования, объектом которого являются природно-территориальные комплексы, целесообразно применять ландшафтный подход (анализ). На разных этапах изучения и оценки ПУ и горимости геосистем в той или иной степени реализуются сформулированные выше принципы ландшафтного анализа, как стадии теоретико-методологического обеспечения исследования.

Реализация функционального принципа подразумевает анализ факторов и условий, формирующих ПУ геосистем. Они могут быть как природного, так и антропогенного характера. Одни из критических природных факторов — климатические (макроклиматические), определяющие фоновые метеоусловия развития геосистем, влияют на риск возникновения и распространения пожаров (режим осадков, ветровой и температурный режим). Также важными являются внутриландшафтные факторы и условия,

связанные с локальным географическим местоположением, которые определяют природный режим геосистем: рельеф, подстилающие породы и почвы, характер растительности, локальное окружение [22].

К одним из главных условий (факторов) функционирования геосистем, обусловливающих ПУ и фактическую горимость лесов, можно отнести водоэнергетические условия, такие как влагообмен между компонентами геосистем в системе почва–растительность–атмосферный воздух, определяющий мезо- и микроклиматические характеристики ландшафтов. Интенсивность влагообмена во многом зависит от количества осадков и влажности почвы, что определяется макроклиматическими факторами и геоморфологическими особенностями местоположения. Также значительное влияние на влагообмен оказывает характер растительности (тип растительности, породный состав древостоя), ее способность вовлекать определенный объем воды в оборот через перехват осадков растительным покровом, транспирацию и физическое испарение, определяя тем самым водно-тепловой режим геосистем [22].

Взаимосвязь водного и теплового режимов ландшафтов в свете сказанного выше можно описать уравнением теплового баланса суши, предложенным М.И. Будыко [23]:

$$R = LE + P, \quad (1)$$

где R — радиационный поток тепла, LE — затраты 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 уровня влагообмена (транспирация и физическое испарение) растительного покрова с атмосферой в лесных геосистемах, причем показатель LE во многом определяется породным составом лесов [24].

Из уравнения (1) следует, что чем выше поток скрытого тепла, т. е. чем больше значимость лесных ландшафтов в водоэнергетическом обмене, тем ниже уровень турбулентного потока явного тепла P и, следовательно, тем ниже значение приповерхностных температур лесных территорий. Лесные геосистемы с высокой ПУ характеризуются высоким уровнем влагообмена и минимальными значениями приповерхностных температур. Эта закономерность учитывалась при изучении транспирационного и противопожарного потенциалов различных типов леса на базе анализа тепловых инфракрасных космических снимков в виде термических показателей земной поверхности для регионов Прибайкалья и Среднеенисейской Сибири [24, 25].

Таким образом, величина приповерхностной температуры, регистрируемой с помощью данных ДЗЗ, является комплексным показателем, отражающим водно-тепловой режим геосистем, который формируется в результате взаимодействия совокупности климатических, геоморфологических и биологических ландшафтообразующих факторов. Данное утверждение представляет собой логическое следствие реализации не только функционального, но и комплексного принципа ландшафтного анализа, при котором в оценке ПУ геосистем используются комплексные показатели, отражающие взаимосвязь факторов и компонентов геосистем через вещественно-энергетический (водно-энергетический) обмен.

Реализация динамического и классификационно-иерархического принципов осуществлялась при создании ландшафтно-информационной основы исследования — электронной ландшафтной карты на территорию юга Селенгинского среднегорья и легенды к ней. При этом применялись ландшафтно-типологический и факторально-динамический подходы. В результате была построена генерализованная карта топогеомеров уровня групп фаций, показывающих факторально-динамическую структуру геосистем территории, которая отражает локальное внутриландшафтное разнообразие природных условий и факторов, влияющих на ПУ геосистем. Полноценный вариант этой карты с легендой, демонстрирующей всю классификационно-иерархическую структуру геосистем, а также подробное обоснование подходов к созданию карты дано в более ранней работе [21]. В настоящем исследовании представлен упрощенный вариант данной карты и легенды, адаптированный для целей оценки ПУ лесных геосистем (рис. 1, см. таблицу). В легенде карты (см. таблицу) отражены геоморфологические особенности геосистем (рельеф, характер подстилающих пород), почвы и растительность. Карта дает представление о свойствах местоположения геосистем, определяющих их состояние и ПУ. С целью оптимизации соотношения масштабов исследования и объекта картографирования (топогеомеры уровня групп фаций) составление карты проводилось с учетом генерализации картографируемых выделов. Так, на карте представлены не отдельные выделы фаций, а ареалы очагов скопления фаций, относящихся к определенной преобладающей группе. Территориальное доминирование этих фаций внутри ареала, по сравнению с вкраплениями фаций других групп, показывает преобладающие локальные природные условия внутри ареала, характерные для доминирующей группы фаций.

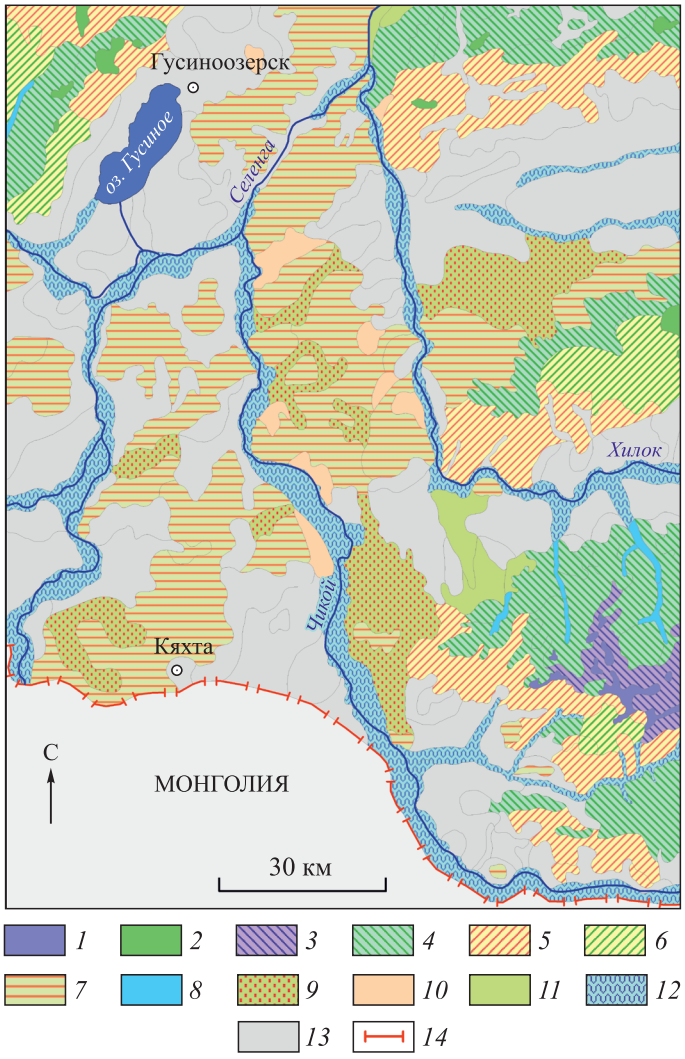

Рис. 1. Карта лесных геосистем юга Селенгинского среднегорья.

1–13 — типы геосистем (см. таблицу), *14* — государственная граница.

С целью оценки ПУ геосистем применялся летний дневной безоблачный космический снимок Landsat 8 OLI и TIRS. Для получения приповерхностных температур территории использовался дальний инфракрасный спектральный канал (канал 10; 10,3–11,3 мкм). Расчеты осуществлялись в программе QGIS с использованием плагина Land Surface Temperature (LST). В итоге создавалось индексное температурное изображение земной поверхности, характеризующее силу турбулентных потоков явного тепла, исходящих от ландшафтов [22]. Для подтверждения связи высокого влагообменного потенциала и, соответственно, высокой ПУ лесных геосистем с низкими показателями приповерхностных температур создавалось индексное изображение NDMI (Normalized difference moisture index — нормализованный разностный индекс влажности). Этот индекс показывает уровень влажности в растительности и используется с целью мониторинга засух и определения характера горючих материалов. Для расчета индекса используются значения спектральной яркости в ближней инфракрасной и средней инфракрасной областях спектра [26]:

$$NDMI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR), \quad (2)$$

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).

Впоследствии был проведен совместный анализ полученных результатов методом наложения данных: на индексные изображения LST и NDMI накладывалась сетка ландшафтных выделов карты для выявления ранговых распределений и обнаружения модальных значений температуры и индексов влажности, характерных для каждой группы фаций (рис. 2). Вышеуказанные операции реализуют дискретный (дифференцированный) принцип, при котором объект анализа — это не множества точек пространства или вся совокупность геосистемных выделов в целом, а их отдельные группы, объединенные по тем или иным признакам в определенные типы геосистем (группы фаций).

На основе полученных данных была выполнена сравнительная экспертная оценка ПУ разных типов лесных геосистем по балльной шкале: 1 — очень низкая, 2 — низкая, 3 — средняя, 4 — высокая, 5 — очень высокая.

Анализ фактической горимости проводился на основе временного ряда космических снимков Landsat 1 — 5 MSS, 4 — 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI, полученных в теплый пожароопасный период года (с апреля по сентябрь) с 1975 по 2022 гг. Анализ осуществлялся методом визуального дешифрирования свежих гарей на синтезированных RGB-изображениях снимков, оптимально определяющих границы и площади гарей [22]. Горимость (B) лесных геосистем высчитывалась по формуле:

$$B = S_i/D_i, \quad (3)$$

где S_i — площадь гарей в i-й группе фаций, зафиксированная на космических снимках за исследуемый период; D_i — доля площади i-й группы фаций ко всей площади лесных геосистем.

Противопожарная устойчивость (ПУ) и горимость лесных геосистем юга Селенгинского среднегорья

Номер на рис. 1	Тип лесных геосистем (группы фаций)	Модальные значения приповерхностных температур, °С	ПУ	Горимость, %
	Горно-таежные геосистемы			
1	Лиственнично-кедровые кустарничково-мелкотравно-зеленомошные леса на плоских водоразделах, сложенных элювиальными отложениями (глыбы, щебень, дресва, суглинки) на подзолистых почвах	–19–22	Очень высокая	0,36
2	Сосново-лиственничные кустарничково-мохово-травяные леса на плоских водоразделах, сложенных элювиальными отложениями (суглинки, глыбы, щебень, дресва) на дерново-подзолистых почвах	»	Очень высокая	5,63
3	Лиственнично-кедровые кустарничково-зеленомошные на склонах преимущественно северных экспозиций, сложенных делювиальными и коллювиально-делювиальными отложениями (суглинки с дресвой, щебнем и глыбами) на подбурах	–18–22	Очень высокая	0,13
4	Березово-лиственничные мохово-травяные кустарниковые леса на склонах преимущественно северных экспозиций, сложенных делювиальными и коллювиально-делювиальными отложениями (суглинки с дресвой, щебнем и глыбами) на дерново-подбурах и дерново-подзолистых почвах	–19–23	Очень высокая	9,08
5	Березово-сосновые и сосновые кустарничково-травяные леса на склонах преимущественно южных экспозиций, сложенных делювиальными и коллювиально-делювиальными отложениями (суглинки с дресвой, щебнем и глыбами) на дерновых таежных почвах	–25–27–33	Средняя	8,48
6	Лиственнично-березовые с сосной травяные леса на склонах преимущественно южных экспозиций, сложенных делювиальными и коллювиально-делювиальными отложениями (суглинки с дресвой, щебнем и глыбами) на дерновых таежных почвах	–24–26	Высокая	13,06
7	Сосновые и березово-сосновые разнотравные кустарниковые местами остепненные леса на склонах низкогорий и холмисто-увалистых возвышенностях, сложенных делювиальными в сочетании с эоловыми отложениями (супеси, пески с щебнем и дресвой) на легких дерново-серых почвах	–36–41	Очень низкая	18,84
8	Лиственнично-березовые с елью кустарниковые разнотравно-крупнотравные леса в речных долинах межгорных понижений на аллювиальных, аллювиально-пролювиальных и аллювиально-делювиальных отложениях (пески, супеси с гравием, галькой, суглинки с дресвой и щебнем) на слоисто-аллювиальных, аллювиальных торфяно-глеевых и перегнойно-глеевых почвах	–18–24	Очень высокая	2,03
	Подгорно-равнинные подтаежные геосистемы			
9	Сосновые с березой кустарниковые разнотравные, местами мертвопокровные леса на предгорной полигенетической равнине, переработанной эоловыми и другими экзогенными процессами, сложенной эоловыми и делювиально-пролювиальными отложениями (пески, лёссовидные супеси с дресвой и щебнем, алевриты) на псаммоземах (сосновые боры)	–38–40	Очень низкая	11,85
10	Березово-сосновые разнотравные остепненные леса на предгорных шлейфах и конусах выноса, сложенных делювиально-пролювиальными, эоловыми отложениями (супеси с дресвой и щебнем, пески) на дерновых таежных почвах и псаммоземах	–38–43	Очень низкая	10,67
11	Березово-сосновые и сосново-березовые с кустарником разнотравные леса на аллювиально-озерных равнинах, сложенных аллювиально-озерными отложениями (супеси, пески мелкозернистые, алевролитовые, с прослоями гальки, гравия) на серых метаморфических почвах	–33–35	Низкая	19,66
12	Кустарниковые 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 слоисто-аллювиальных, аллювиальных перегнойно-глеевых, аллювиальных луговых серо- и темногумусовых и лугово-болотных почвах	–24–26–39	Высокая	0,20
13	Нелесные геосистемы и геотехнические системы (степи, селитебные территории, сельхозугодья и др.)	Нет данных	Нет данных	Нет данных

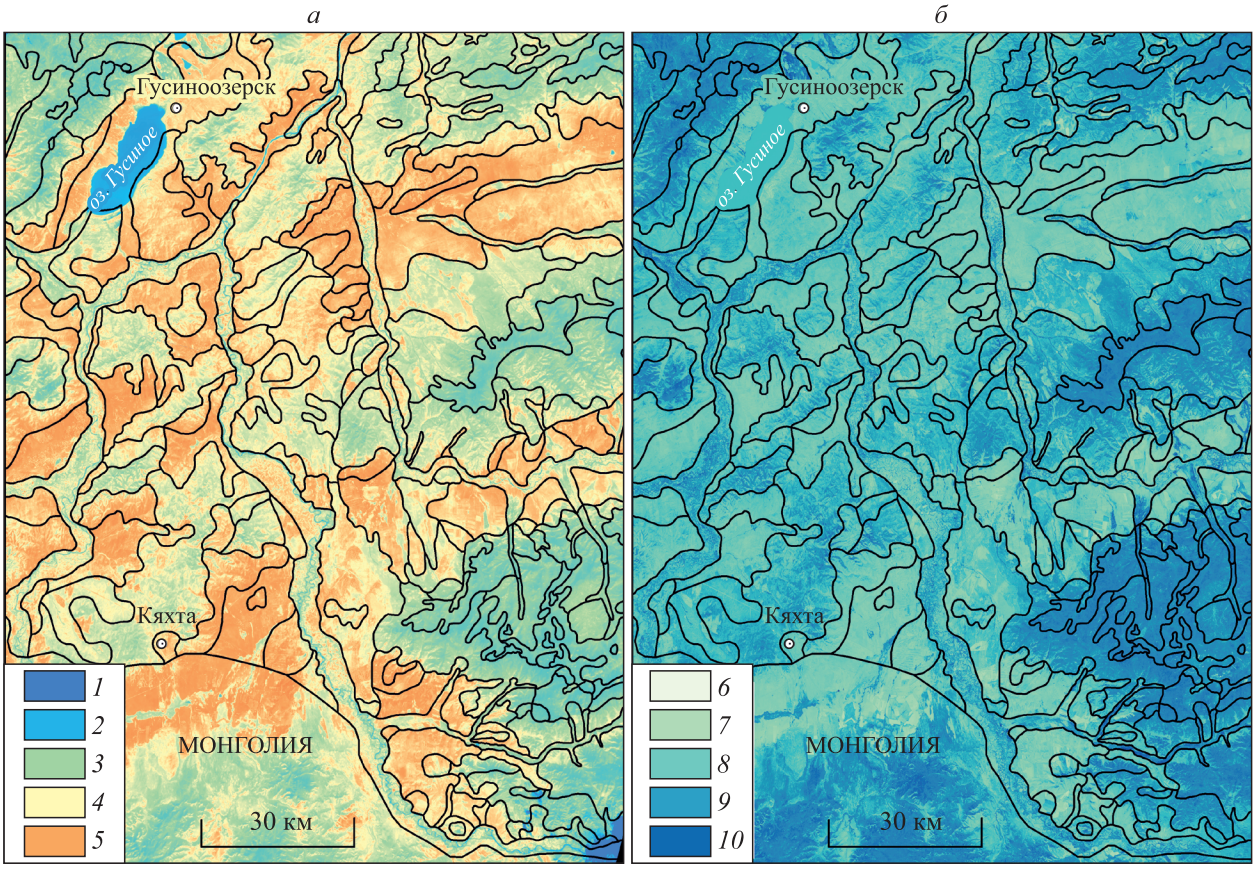

Рис. 2. Индексные изображения приповерхностных температур LST (°C) (*а*) и влажности NDMI (*б*) с нанесенной на них сеткой выделов ландшафтной карты.

Приповерхностные температуры, °C: *1* — <10, *2* — 11–19, *3* — 20–29, *4* — 30–39, *5* — >40. Нормализованный разностный индекс влажности (NDMI): *6* — < −0,05, *7* — −004–0, *8* — 0,01–0,1, *9* — 0,11–0,2, *10* — >0,21.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совместный анализ индексных изображений и ландшафтно-информационной основы позволил дифференцировать различные типы лесных геосистем по их ПУ (рис. 3, см. таблицу).

Исходя из оценки, наиболее высокая ПУ характерна для горно-таежных геосистем среднегорных хребтов (Малханского, Заганского) на водоразделах и склонах преимущественно северных экспозиций. Этим геосистемам свойственны низкие приповерхностные температуры и высокие значения индекса влажности NDMI. Высокий уровень влагообмена и, соответственно, очень высокая ПУ здесь определяются как условиями местоположения (северные наветренные склоны), так и тем, что основной лесообразующей породой в данных геосистемах является лиственница сибирская (*Larix sibirica*), которая, по сравнению с сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*), отличается большей интенсивностью транспирации [27]. Помимо этого, очень высокая ПУ характерна для долинных геосистем межгорных понижений, в которых накапливается свободная влага с окружающих территорий. Здесь преобладают березовые с кустарником крупнотравные сообщества, которые характеризуются высокой интенсивностью транспирации. Средним уровнем ПУ отличаются горно-таежные геосистемы склонов преимущественно южных экспозиций.

Более высокими значениями приповерхностных температур и, соответственно, меньшей ПУ характеризуются лесные геосистемы на аллювиально-озерных равнинах. Они формируются в условиях относительного недостатка влаги, поэтому здесь доминируют неприхотливые к уровню увлажнения березово-сосновые сообщества. Минимальный уровень ПУ характерен для сосновых разнотравных остепненных, местами мертвопокровных, лесов на холмисто-увалистых возвышенностях, предгорных равнинах, шлейфах и конусах выноса, сложенных эоловыми и делювиально-пролювиальными отложениями (пески, лёссовидные супеси с дресвой и щебнем) на псаммоземах (см. рис. 3, см. таблицу).

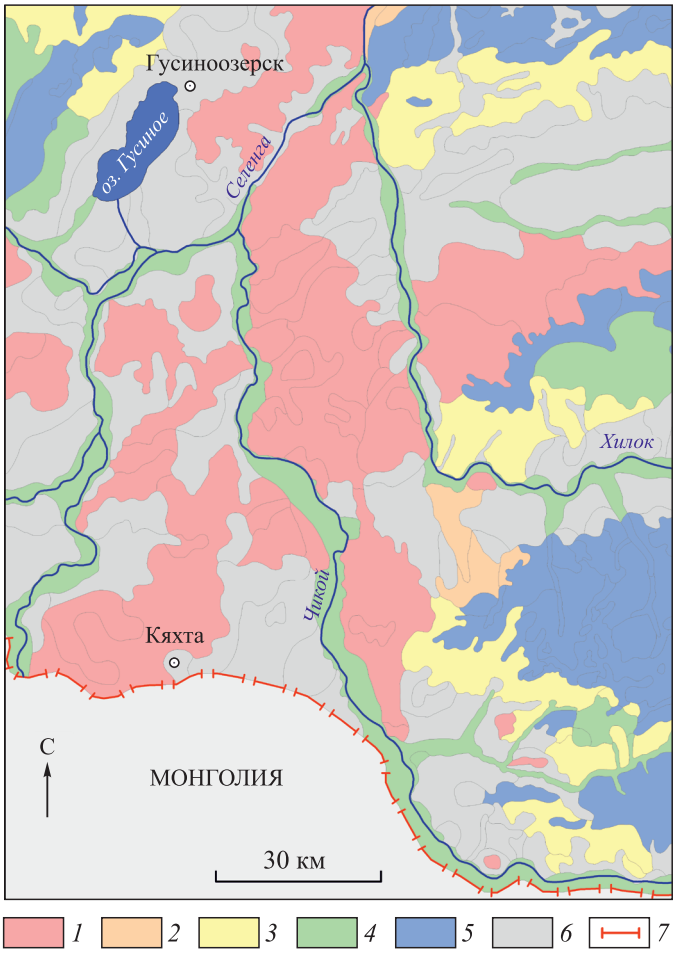

Рис. 3. Противопожарная устойчивость лесных геосистем юга Селенгинского среднегорья.

Уровень противопожарной устойчивости: *1* — очень низкий, *2* — низкий, *3* — средний, *4* — высокий, *5* — очень высокий. *6* — нелесные геосистемы. *7* — государственная граница.

Совместный анализ индексных изображений (LST, NDMI) с ландшафтной картой показал, что, помимо рельефа и характера растительности, на уровень ПУ лесных геосистем значительно влияет состав подстилающих пород и почв. Минимальной ПУ характеризуются лесные геосистемы, сформированные на отложениях и почвах легкого механического состава (пески, супеси), которые не способны долго удерживать свободную влагу. Вследствие этого существует недостаток воды в геосистемах, который усугубляется в засушливые пожароопасные периоды года.

Точность оценки ПУ геосистем, осуществимой с использованием индексных изображений и ландшафтной карты, подтверждается результатом мониторинга фактической горимости лесов, проводимого за последние 50 лет. Анализ разновременных космических снимков Landsat показал, что на картографируемой территории за последние полвека пожарами затронуто около 5402 из 10 610 км^2 территории лесных геосистем, т. е. порядка 51 % площади всех лесов. Наибольший вред от пожаров (около 68 % от всей площади лесных пожаров) причинен сухим сосновым и березово-сосновым лесам на холмисто-увалистых возвышенных и подгорно-равнинных местоположениях на аллювиально-озерных, делювиально-пролювиальных и эоловых отложениях легкого механического состава. Эти геосистемы при оценке попали в группу с очень низкой и низкой ПУ. Максимальный ущерб от пожаров нанесен в период с 1996 по 2011 гг. За эти 15 лет лесные пожары фиксировались на площади около 4000 км^2. В данный период на территории Забайкалья регистрировались крайне засушливые весенне-летние сезоны, отмеченные во многих работах по лесной пирологии [9, 28, 29]. Анализ средних значений горимости (в %), рассчитанных для каждого уровня ПУ, показал: для геосистем с очень низким уровнем ПУ характерна горимость 13,79 %, для низкого уровня ПУ— 19,66, среднего — 8,48, высокого — 6,63, очень высокого — 3,45 %. Таким образом, наблюдается тенденция уменьшения уровня горимости с увеличением ПУ лесных геосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирован опыт применения ландшафтного анализа для решения практической задачи — оценки ПУ лесных геосистем. При этом ландшафтный анализ нами рассматривается как теоретико-методологическая основа фундаментальных и прикладных исследований природно-территориальных комплексов (геосистем, ландшафтов). Сам процесс изучения и оценки ПУ геосистем осуществляется в форме поэтапной реализации принципов ландшафтного анализа (функционального, комплексного, динамического, классификационно-иерархического, дискретного), которые на практике выражаются в анализе ландшафтообразующих факторов и условий, в выборе комплексных показателей функционирования и развития геосистем, в создании ландшафтно-информационной основы оценки, в совместном анализе полученных данных комплексных показателей и ландшафтно-типологической карты с последующей оценкой ПУ разных типов геосистем.

При оценке ПУ учитывался комплексный показатель, характеризующий влагообменный потенциал лесных геосистем и регистрируемый с помощью методов дистанционного зондирования Земли. В настоящей работе не стояли задачи учета и оценки всех факторов и условий, влияющих на ПУ и горимость лесов (влияние антропогенного фактора, анализ экстремальных погодных явлений, свойства лесных горючих материалов и др.). Эти задачи могут быть решены в рамках следующего этапа изучения воздействия пирогенного фактора на развитие геосистем территории Селенгинского среднегорья.

Работа выполнена за счет средств государственного задания Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (АААА-А21-121012190056-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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. — P. 2928–2933.
2. **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.
3. **Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M.** Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circum boreal forest // Glob. Change Biol. — 2009. — Vol. 15, Iss. 3. — P. 549–560.
4. **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, N 4. — P. 1–9.
5. **Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G.** Climate change and wildfires in Russia // Contemp. Probl. Ecol. — 2013. — Vol. 6, Iss. 7. — P. 683–692.
6. **Цветков П.А., Буряк Л.В.** Исследования природы пожаров в лесах Сибири // Сибир. лесной журнал. — 2014. — № 3. — С. 25–42.
7. **Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н.** Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. — 2012. — № 2. — С. 5–23.
8. **Пономарев Е.И., Харук В.И.** Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журнал. — 2016. — № 1. — С. 38–46.
9. **Байкальский** регион: общество и природа. Атлас. / Ред. А.Р. Батуев, Л.М. Корытный, В.М. Плюснин. — М.: Паулсен, 2021. — 320 с.
10. **Михеев В.С.** Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. — Новосибирск: Наука, 1987. — 208 с.
11. **Преображенский В.С., Александрова Т.Д., Куприянова Т.П.** Основы ландшафтного анализа. — М.: Наука, 1988. — 192 с.
12. **Сочава В.Б.** Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 318 с.
13. **Исаченко А.Г.** Методы прикладных ландшафтных исследований. — Л.: Наука, 1980. — 222 с.
14. **Преображенский В.С., Фадеева Н.В., Мухина Л.И., Томилов Г.М.** Типы местности и природное районирование Бурятской АССР. — М.: Наука, 1959. — 218 с.
15. **Голубцов В.А., Рыжов Ю.В., Кобылкин Д.В.** Почвообразование и осадконакопление в Селенгинском среднегорье в позднеледниковье и голоцене. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2017. — 139 с.
16. **Фадеева Н.В.** Селенгинское среднегорье (Природные условия и районирование). — Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1963. — 171 с.
17. **Природные** условия и естественные ресурсы СССР. Предбайкалье и Забайкалье / Отв. ред. В.С. Преображенский. — М.: Наука, 1965. — 492 с.
18. **ФГБУ** «ВНИИГМИ-МЦД» [Электронный ресурс]. — http://meteo.ru (дата обращения 04.08.2021).
19. **Ландшафты** юга Восточной Сибири. Карта. М-б 1:1 500 000 / Ред. О.П. Космакова, В.С. Михеев. — М.: ГУГК, 1977.
20. **Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Бадмаев Н.Б., Гынинова А.Б., Убугунов В.Л., Балсанова Л.Д.** Почвы Бурятии: разнообразие, систематика и классификация // Вестн. Бурят. гос. сельскохоз. академии им. В.Р. Филиппова. — 2012. — № 2 (27). — С. 45–52.
21. **Фролов А.А.** Ландшафтообразующие процессы, факторы и ландшафтная структура юга Селенгинского среднегорья // Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2022. — Т. 42. — С. 102–118.
22. **Фролов А.А.** Противопожарный потенциал и горимость лесных геосистем Западного Забайкалья (на примере Чикой-Хилокского междуречья) // Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2021. — Т. 38. — С. 100–114.
23. **Будыко М.И.** Глобальная экология. — М.: Мысль, 1977. — 327 с.
24. **Медведков А.А., Котова М.В.** Противопожарный потенциал лесов водоохранной зоны озера Байкал (на примере территории Байкало-Ленского заповедника) // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2020. — Т. 84, № 5. — С. 764–775.

25. **Медведков А.А.** Подходы к оценке противопожарной функции лесных ландшафтов в условиях бореальной криолитозоны. Т. 2: Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата (ГЕОРИСК–2018). — М.: Изд-во Росс. ун-та дружбы народов, 2018. — С. 209–213.
26. **NDMI** — ArcGIS Pro [Электронный ресурс]. — https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/ndmi.htm (дата обращения 20.08.2021).
27. **Касьянова Л.Н.** Экология растений Прибайкалья (водный обмен). — М.: Наука, 2004. — 288 с.
28. **Борисова Т.А.** Лесные пожары Бурятии: причины и следствия // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. География. Геоэкология. — 2017. — № 2. — С. 78–84.
29. **Евдокименко М.Д.** Пирогенная дигрессия светлохвойных лесов Забайкалья // География и природ. ресурсы. — 2008. — № 2. — С. 109–115.

Поступила в редакцию 28.12.2022
После доработки 14.04.2023
Принята к публикации 29.06.2023