

Карта послепожарной растительности Керженского заповедника*

А. Е. Гнеденко¹, Н. Г. Кадетов², С. П. Урбанавичуте³

¹ Институт географии РАН,

Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

³ Государственный природный биосферный заповедник «Керженский»,

Российская Федерация, 603001, Нижний Новгород, ул. Рождественская, 23

Для цитирования: Гнеденко, А. Е., Кадетов, Н. Г., Урбанавичуте, С. П. (2024). Карта послепожарной растительности Керженского заповедника. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (4), 716–733. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.406>

Территория Заволжья неоднократно испытывала воздействие катастрофических лесных пожаров, последний из которых произошел в 2010 г. На территории Керженского заповедника с 2011 г. проводится мониторинг послепожарного восстановления растительности на постоянных пробных площадях, а в 2014 г. начаты работы по составлению карты растительного покрова на территорию, пройденную пожаром. Картографирование послепожарного состояния растительности сопряжено со значительными трудностями из-за динамичности и мозаичности контуров растительных сообществ. В связи с этим разработан подход, позволивший составить крупномасштабную (1 : 50 000) карту растительности на пострадавшую от пожара 2010 г. часть Керженского заповедника. В основу положено ежегодное полевое обследование ключевых участков и дешифрирование спутниковых снимков с последующим уточнением контуров. В работе использованы снимки Landsat-8 и Sentinel-2 для предварительного дешифрирования растительности и определения точек геоботанических описаний, а также снимки Spot-5 при составлении итоговой карты. Всего составлено более 600 геоботанических описаний, использовавшихся в качестве эталонов для дешифрирования. Установлено, что из лесных сообществ наибольшие площади на участке, пострадавшем от пожара, занимают сосновые травяные и кустарничково-травяные леса. Среди нелесных сообществ заметную роль играют ассоциации с густым подростом березы — осоково-вейниковые и ландышево-вейниковые, а также молиниевые-орляковые. Особое место в структуре растительного покрова занимают черноольховые леса, сохранившиеся после пожаров благодаря сравнительно высокой обводненности, и черноольховые заросли, распространяющиеся преимущественно по протяженным понижениям. Пространственные метрики свидетельствуют о большом разнообразии выделов и высокой равномерности их распределения в пределах картографируемой территории, что может быть связано с воздействием пирогенного фактора. Структура легенды, разработанной для представленной карты, учитывает изменчивость послепожарного состояния растительно-

* Работа выполнена при поддержке Госзадания ИГ РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8) «Биотические, географогидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования» и Программы развития Московского университета (№ 1220).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

сти и может использоваться не только при уточнении карты, но и для картографирования иных территорий, испытавших пирогенное воздействие.

Ключевые слова: дешифрирование, лесные пожары, Керженский заповедник, карта растительности, спутниковые снимки.

1. Введение

Катастрофические лесные пожары 2010 г. в значительной степени изменили структуру растительного покрова Заволжья. Учитывая тот факт, что эта территория испытывала влияние значительных пожаров и ранее — в 1920-е и 1970-е годы — последние крупные пожары могут оказать крайне негативное влияние на состояние биоты территории в целом (Денисов, 1979; Константинов, 2004).

В связи с этим особую значимость представляет мониторинг процессов естественного восстановления растительного покрова Заволжья. Проведение подобного мониторинга возможно в условиях Керженского заповедника в Нижегородской области, около половины территории которого в той или иной мере затронуто пожарами 2010 г. Особую ценность заповеднику как полигону для проведения подобных работ придает длительная история антропогенной трансформации его территории в прошлом. Так, в начале 1970-х более $\frac{3}{4}$ ее было пройдено пожаром (рис. 1), остатки сгоревшего леса вывезены по созданной обширной сети узкоколейных железных дорог, а на месте горельников созданы не всегда успешные культуры сосны. Таким образом, в нынешней ситуации наблюдается уникальный случай, когда впервые после длительной антропогенной трансформации происходит естественное восстановление лесов без какого-либо участия человека (Аверина, 2001; Кораблёв, 2001; Кадетов, 2017).

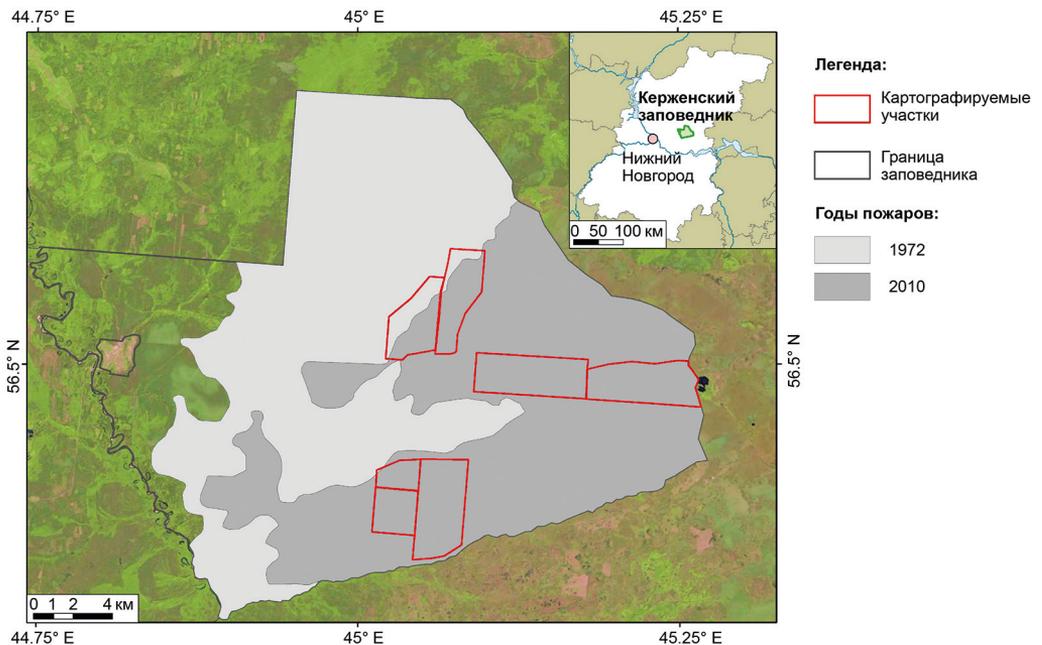


Рис. 1. Карта расположения заповедника, границы гари и границы ключевых участков

Заповедник расположен в зоне широколиственно-хвойных лесов (Кадетов и др., 2015), однако большая часть его территории приурочена к обширной песчаной зандровой равнине (небольшие участки моренных суглинков представлены лишь близ его северо-западных границ). В целом ландшафты заповедника носят полесский характер: преобладание сосновых лесов на песчаных гривах в сочетании с верховыми и переходными болотами в понижениях (Садков и Козлов, 2014).

Актуальность проведенных работ заключается еще и в том, что Керженский заповедник входит в состав водно-болотных угодий международного значения — Камско-Бакалдинской группы болот, являющейся также ключевой орнитологической территорией международного значения. Состояние природных комплексов на его территории имеет большое значение на глобальном уровне, что обуславливает важность мониторинга послепожарного состояния растительности заповедника.

Отслеживание изменений растительности на территории заповедника проводилось на постоянных пробных площадях (ППП), заложенных с учетом охвата всех типичных растительных ассоциаций и разных типов пожаров (верховых, низовых, внутрпочвенных), затронувших те или иные участки (Кадетов, 2017). Важной составляющей работы также является не только регистрация состояния растительного покрова на постоянных пробных площадях, но и отслеживание изменений его структуры на всей пройденной пожарами территории, что осуществимо только с применением картографических методов. Начало этой работы было положено в 2014–2015 гг., когда в рамках изучения послепожарного состояния растительного покрова началось создание карты растительности.

Вопрос методики составления карт послепожарного состояния растительности остается во многом нерешенным, поскольку в основном работы в данном направлении сосредоточены на оценке ущерба после пожаров и общей восстановительной динамики (Барталев и др., 2012; Novo et al., 2020; Perez-Cabello et al., 2021; Bousquet et al., 2022). Как правило, такие исследования опираются на выявление изменений спектральных характеристик пострадавших от пожаров участков, и в крупном масштабе могут возникать ошибки классификации растительности из-за высокой схожести спектральных характеристик ассоциаций (Mitri and Gitas, 2013; Pickell et al., 2016).

Дешифрирование и последующее картографирование послепожарного растительного покрова также сопряжено с известной сложностью, вызванной мозаичностью и мелкоконтурностью выделов. Необходимо учитывать динамический аспект, в связи с чем легенда к карте должна, по возможности, включать предполагаемые последующие сукцессионные стадии. Поэтому при составлении карты необходим комплексный подход, включающий предварительное автоматизированное дешифрирование, картографирование отдельных сообществ с использованием визуальных эталонов и последующую проверку по результатам полевых исследований. Схожий подход предлагается в обзорной работе (Szpakowski and Jensen, 2019), где указывается, что из-за специфического характера спектрального отклика растительности на разных стадиях восстановления использование одного метода может быть не лучшим способом решения задачи по картографированию послепожарного состояния растительного покрова и необходимо применение нескольких подходов в каждом случае.

Отметим, что в большинстве случаев имеющиеся публикации по картографическому отображению послепожарной растительности на территории России

связаны с показом структуры растительного покрова в исключительно крупных масштабах (до 1 : 500) и рассматривают лишь отдельные небольшие локалитеты с отображением микроценозов или синузий — по большей части схемы пробных площадей и их окрестностей (Кулешова и др., 1984; Громько и Смирнова, 2002; Кулешова, 2002; Шугаев и др., 2015; Комарова и др., 2017).

Как уже было упомянуто, растительный покров после пожаров отличается высокой динамичностью и изменчивостью, что определяет известную сложность его картографирования. В случае с Керженским заповедником она усугубляется длительной историей антропогенной трансформации территории, в ходе которой зачастую формировались растительные группировки, не в полной мере соответствующие характеристикам морфолитогенной основы исходного ландшафта, как результат многочисленных и разнообразных по силе и продолжительности воздействий человеческой деятельности. В частности, подобной ситуации способствовали упоминавшиеся работы по расчистке леса и посадке монокультур сосны после пожаров 1972 г. В итоге после нового цикла пожаров растительные сообщества, формирующиеся естественным путем без вмешательства человека, могут заметно отличаться от тех, что могли до пожара выступать как «исходные». Это обуславливает необходимость разработки легенды карты, не увязанной на существовавшие до пожара растительные сообщества, а учитывающей их лишь отчасти. Также концепция карты должна принимать во внимание динамичность послепожарной растительности, что отражается и в разрабатываемой легенде, охватывающей все основные восстановительные стадии растительного покрова и имеющей потенциал для точечной доработки по мере накопления мониторинговых данных. Такой подход обеспечивает возможность составления и сравнения карт послепожарной растительности территории на последующие временные промежутки, что позволяет детально проследить пространственные изменения выделов и оценить темпы скорости смен восстановительных стадий.

2. Материалы и методы

Составление карты послепожарного состояния растительности требует задействования широкого спектра используемых материалов, в первую очередь актуальных спутниковых снимков и массива геоботанических описаний, охватывающих максимально возможный спектр восстановительных стадий сообществ. В работе использованы спутниковые снимки серии Landsat-8 и Sentinel-2, поскольку они имеют достаточный временной охват для одной серии спутников, высокую частоту съемки, позволяющую получить несколько безоблачных снимков картографируемой территории за вегетационный период, и пространственное разрешение, соответствующее целям средне- и крупномасштабного картографирования (30 м в видимом диапазоне у Landsat-8 и 10 м в видимом диапазоне у Sentinel-2). Снимки этих спутников широко применяются при автоматизированном и визуальном дешифрировании последствий пожаров (Слинкина и др., 2008; Рожков и Кондакова, 2019; Шинкаренко и др., 2021), поэтому, исходя из перечисленных факторов, было принято решение использовать их в качестве основы для составления карты.

В качестве «опорного» года картографирования выступает 2016 г., поскольку именно тогда был проведен сбор данных для составления участков карты послепо-

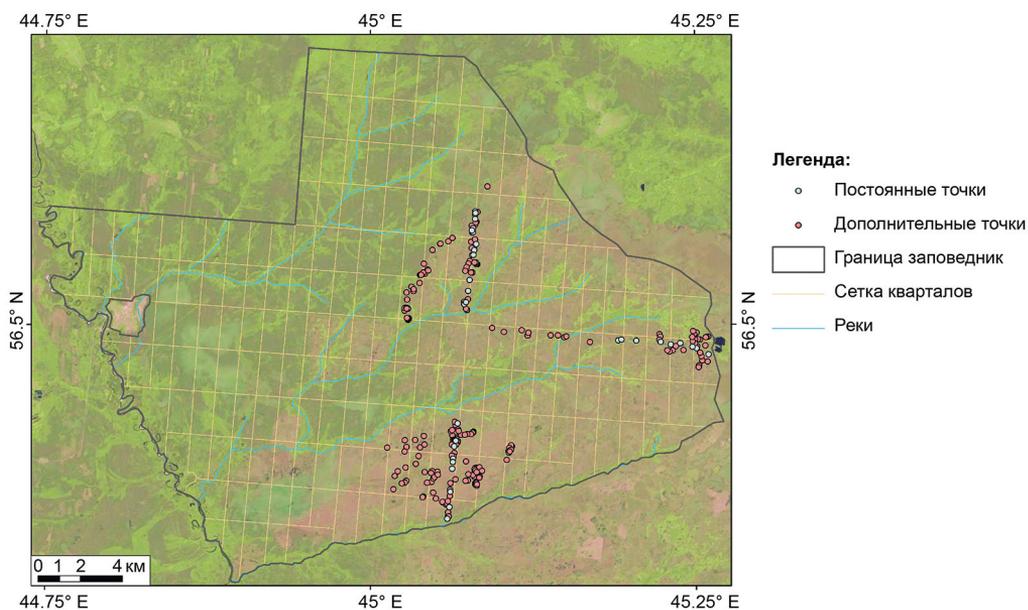


Рис. 2. Расположение постоянных пробных площадей и дополнительных точек описаний

жарного состояния растительности на области, прилегающие к мониторинговым профилям. Также отметим, что именно в этот год произошло одно из ключевых событий в течение первых послепожарных лет — массовый вывал погибшего древостоя, что важно как с позиций динамики растительного покрова, так и с точки зрения дешифрирования снимков.

В числе прочих источников представленная работа основана на обширном массиве полных полевых геоботанических описаний — всего более 600 точек, достаточно равномерно распределенных по модельным участкам территории, которая пострадала после пожара, и отражающих все типичные сообщества, характерные для нее (рис. 2). Это позволило не только дешифрировать растительный покров с высокой детальностью, но и разработать легенду, использование которой возможно без значительных корректировок структурных разделов при картографировании растительности на последующих стадиях восстановления. Описания выполнялись по стандартным методикам (Сукачёв и Зонн, 1961; Ярмишко и Лянгузова, 2002).

Процесс составления карты включал несколько тематических этапов.

1. Предварительное дешифрирование контуров растительности, определение будущих временных пробных площадей и ключевых картографируемых участков, проведение полевых работ.

2. Обработка полевых данных, разработка легенды (в первый год — разработка, в последующие годы — ее корректировка), комбинированное автоматизированное и визуальное дешифрирование спутниковых снимков.

3. Составление карт послепожарного состояния растительности на ключевые участки.

4. Объединение картографированных участков в общую карту на всю территорию, затронутую пожаром 2010 г.

2.1. Первый этап

Для предварительного дешифрирования снимков с целью разметки дополнительных точек описаний в первый год работ по картографированию использовали снимок Landsat-8 (15.07.2015), имеющий пространственное разрешение 30 м в видимом спектре. Хотя спутниковые снимки Landsat активно используются при составлении карт растительности в масштабе до 1 : 50 000, для данной работы использование только снимков Landsat было невозможно, поскольку его пространственного разрешения недостаточно для выделения большого количества подразделений, распространение которых имеет мозаичный характер. Однако применение их в качестве предварительного источника данных о территории возможно и часто используется в исследованиях (Сандлерский, 2017; Senf and Seidl, 2021). Также снимок Landsat-8 использовали как один из компонентов для проведения процедуры паншарпенинга (Ibarrola-Ulzurruna et al., 2017), т.е. «слияния» многозонального и панхроматического изображений, в качестве которого использовался снимок Spot-5. Проведение данной операции требовало, чтобы пространственное разрешение снимков различалось более чем в два раза, иначе алгоритмы обработки будут работать некорректно, в результате чего итоговое изображение невозможно использовать. Поскольку пространственное разрешение снимков Landsat-8 составляет 30 м, а панхроматического снимка Spot-5 — 5 м, то имеющиеся материалы полностью удовлетворяли условию проведения процедуры. После процедуры полученное изображение можно использовать только для визуального дешифрирования из-за отсутствия спектральных каналов, однако в представленной работе это оправдано, поскольку многие выделенные картографируемые единицы очень близки по своим спектральным свойствам и не выделялись надежно автоматизированными методами.

2.2. Второй этап

После сбора полевых материалов в «опорный» год составления карты производили их обработку и классификацию для подготовки легенды. Поскольку в качестве ключевых участков для картографирования использовали области, прилегающие к профилю (Кадетов и Гнеденко, 2019; Kadetov et al., 2021), при составлении легенды карты принято, что имеющиеся ППП изначально заложены с учетом максимального охвата как возможных типов пожаров (верховые, низовые и внутрипочвенные) и положений в мезорельефе (вершины грив, их склоны и различные понижения), так и исходных сообществ. Таким образом, легенда, разрабатываемая для ключевых участков, включала все основные подразделения и в дальнейшем лишь незначительно дорабатывалась. Классификацию послепожарных сообществ проводили с использованием эколого-морфологического подхода (Лавренко, 1961; Шенников, 1964; Александрова, 1969).

Снимок Landsat-8, прошедший процедуру паншарпенинга, использовали не только для предварительной разметки точек временных пробных площадей, но и как вспомогательный источник данных при составлении карт ключевых участков. Для проведения визуального дешифрирования использовали также вспомогательную схему автоматизированной классификации послепожарной растительно-

сти и подбирали визуальные дешифровочные эталоны для каждого картографируемого подразделения. Также в качестве вспомогательных материалов использовали данные открытых картографических интернет-сервисов, ранее составленную карту допожарной растительности на всю территорию заповедника (Попов, 2010), ландшафтную карту заповедника (Садков и Козлов, 2014) и карту типов возгораний (Садков, 2015) — все они позволили получить исчерпывающую информацию для проведения визуального дешифрирования. Помимо этого, в работе использовали спутниковые снимки Sentinel-2 для предварительного дешифрирования основных выделов послепожарной растительности и последующего разделения классов, близких по спектральным характеристикам, методами визуального дешифрирования. В качестве основного подхода автоматизированного дешифрирования использовали классификацию методом опорных векторов (Vector Machine Classifier). Ее преимущество заключается в низкой чувствительности к шуму во входных изображениях, а также меньшей чувствительности к неравному размеру обучающих выборок (Valero and Alzate, 2019), что особенно важно при большом количестве входных классов с близкими спектральными характеристиками.

2.3. Третий этап

Описанный алгоритм использовали при поэтапном составлении модельных участков карты в период с 2016 по 2020 г., в течение которого обследовали новые участки территории, пострадавшей после пожара 2010 г., корректировали и дополняли легенду. Картографируемая территория расширялась по мере получения новых полевых данных, а уже составленные фрагменты карты по необходимости корректировали исходя из результатов классификации описанных сообществ на новые участки контуров. Необходимость корректировки заключалась в том, что из-за высокой дробности контуров и сильной схожести как по спектральным, так и по текстурным характеристикам, некоторые категории сообществ нуждались в уточнении отображения на карте. Поскольку полевые исследования проводили ежегодно, это дало возможность не только поэтапно составлять высокодетальные карты на отдельные участки территории, пройденной пожаром, но и проверить качество уже готовых картографических материалов.

2.4. Четвертый этап

При составлении итоговой карты послепожарного состояния растительности совмещены отдельные модельные участки, на которые уже были составлены фрагменты карты, и проведено дешифрирование областей, не охваченных ранее обследованиями. Обширная база полевых материалов геоботанических описаний, накопленных в предшествующие сезоны, позволила сформировать выборку эталонов для каждого раздела легенды и составить итоговую карту в крупном (1 : 50 000) масштабе.

Использование столь крупного масштаба хотя и весьма трудозатратно, в сравнении с более мелким, но оправдано в первую очередь сложностью исследуемой территории и неоднозначностью процессов восстановления растительного покрова даже на сходных в первые годы после пожаров участках, что связано с длитель-

ной историей антропогенной трансформации территории. Сложность территории обусловлена также разнообразием сочетаний типов пожаров (верховые, различные по интенсивности низовые и внутрипочвенные) и базовых форм мезорельефа (вершины грив различной величины, склоны, разнообразные понижения). Теми же причинами во многом обусловлена и высокая подробность легенды.

В дополнение к составленной карте были рассчитаны метрики разнообразия и расположения выделов. Эти метрики описывают размещение или пространственный характер участков как на территории в целом, так и для отдельных типов выделов (Cheng and Jan, 2000). Количественная оценка структуры описывается несколькими индексами для измерения состава и конфигурации выделов. Пространственные индексы количественно определяют территориальные характеристики исследуемого участка в целом или всей мозаики выделов, из которых он состоит (McGarigal et al., 2002). Они также использованы при выявлении и установлении взаимосвязей между структурой и функциями различных видов выделов (Botequilha-Leitao et al., 2006).

3. Результаты

Как итог обработки полученных материалов и применения опробованных на модельных участках методик получена общая карта послепожарной растительности Керженского заповедника (рис. 3–4). В представленной в табличном виде легенде, коррелирующей с проведенной в эколого-морфологической системе классификацией растительности, содержится 41 номер (рис. 4). В ней также на верхнем уровне происходит разделение сообществ по признаку сохранности (наличия) древесного яруса: по сути — разделение на лесной и «нелесной» («травяной», «луговой») типы растительности. Как лесные, так и «нелесные» сообщества отнесены к одним и тем

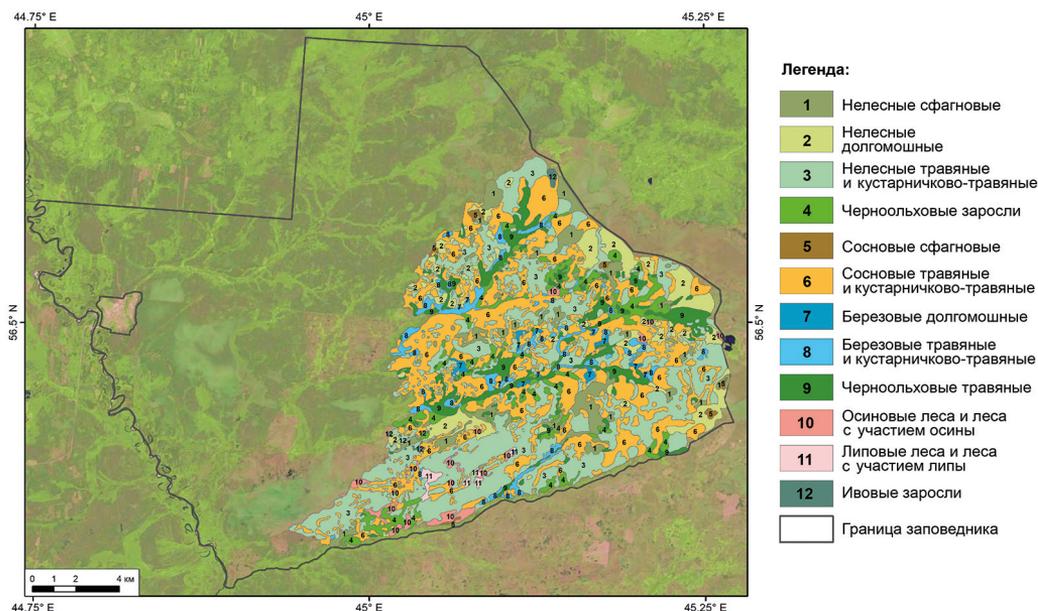


Рис. 3. Карта послепожарного состояния растительности

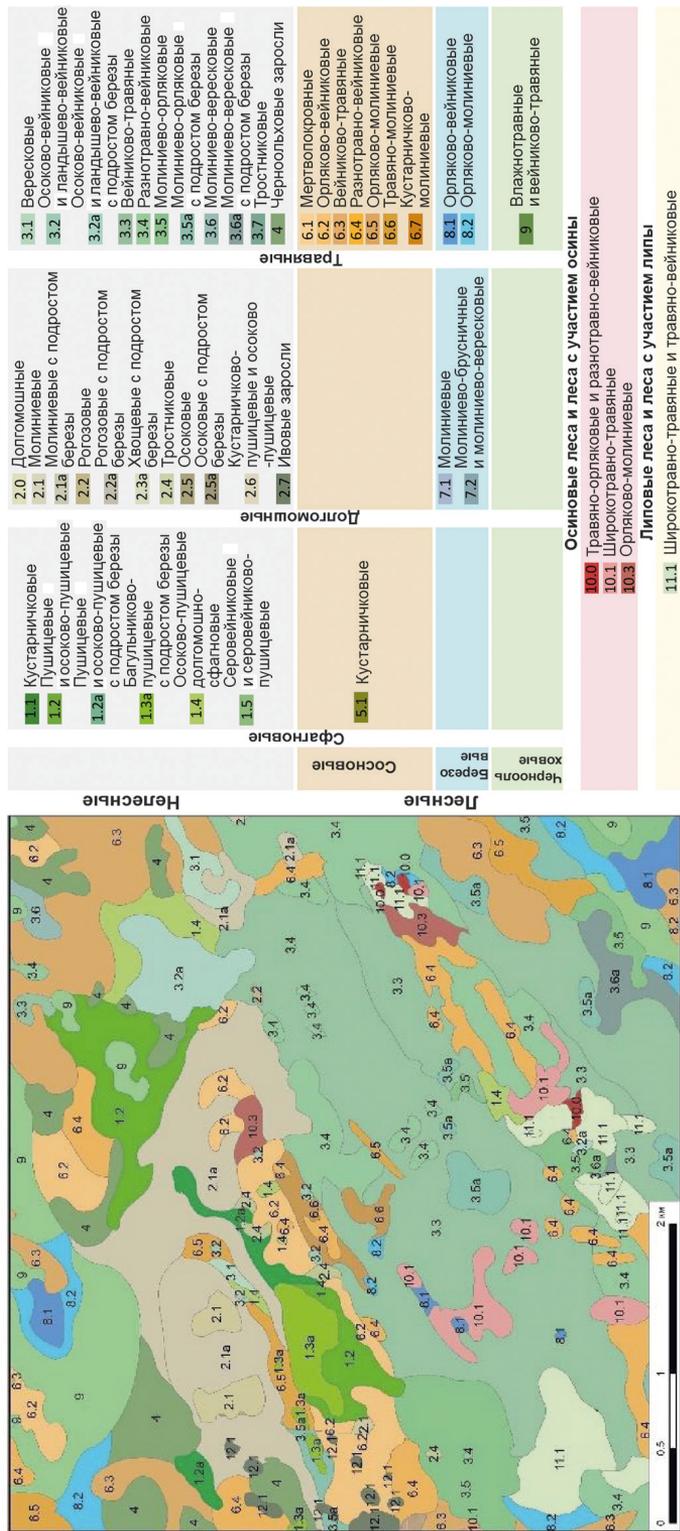


Рис. 4. Крупномасштабный фрагмент карты послепожарного состояния растительности и легенда

же классам ассоциаций: сфагновые, долгомошные, травяные и травяно-кустарничковые. Отдельно выделены сообщества со значительным участием подроста березы как наиболее динамично изменяющиеся, по данным стационарных наблюдений. В качестве особой безранговой единицы показаны черноольховые заросли, также активно разрастающиеся после пожаров по понижениям.

В ходе полевых работ в 2021 г. было составлено 15 полных геоботанических описаний для проверки точности карты. Из них четыре описания полностью не совпали с картой, пять описаний относятся к близким сообществам и столько же описаний соответствуют контурам, заданным на карте. Область работ охватывала участок в 3 км² и для более полной проверки планируются маршрутные описание в последующие полевые сезоны.

4. Обсуждение

На основе выделенных на карте контуров рассчитаны площади, занимаемые различными сообществами (рис. 5). Установлено, что среди сохранивших древо-стой сообществ наибольшие площади на участке, пострадавшем от пожара, занимают различные варианты сосновых лесов, доминировавших и до пожара 2010 г. Вейниково-травяные более распространены в центральной и северной частях послепожарной территории, разнотравно-вейниковые — в основном в южной части. Сосновые леса представляют собой своего рода «базовый» синтаксон при восстановлении лесов заповедника после пожаров, среди них несколько меньшие площади занимают орляково-молиновые леса, связанные со сравнительно более увлажненными участками.

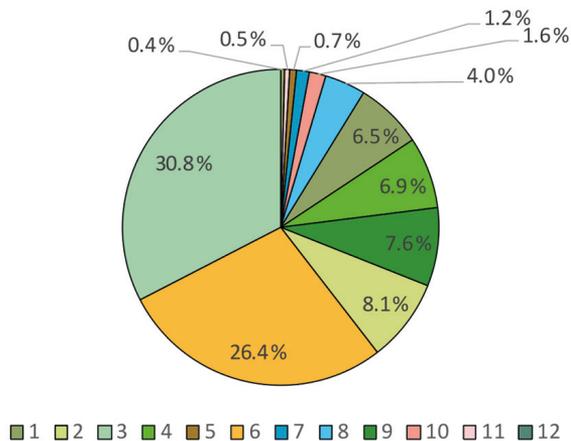


Рис. 5. Распределение площадей контуров послепожарной растительности:

- 1 — нелесные сфагновые; 2 — нелесные долгомошные;
- 3 — нелесные травяные и кустарничково-травяные;
- 4 — черноольховые заросли; 5 — сосновые сфагновые;
- 6 — сосновые травяные и кустарничково-травяные;
- 7 — березовые долгомошные; 8 — березовые травяные и кустарничково-травяные;
- 9 — черноольховые травяные; 10 — осиновые леса и леса с участием осины; 11 — липовые леса и леса с участием липы; 12 — ивовые заросли

В нелесных сообществах наиболее представительны по площади вейниково-травяные и разнотравно-вейниковые сообщества — в известной мере «аналоги» вышеуказанных сосновых сообществ в качестве базовых. Вместе с тем характерной чертой является то, что лидерами в этой группе выступают сообщества с густым подростом березы — осоково-вейниковые и ландышево-вейниковые, а также молиниевые-орляковые. Особое место в структуре растительного покрова занимают черноольховые леса — высокая сохранность которых обусловлена во многом сравнительно высокой обводненностью, а также черноольховые заросли, год от года увеличивающие свою площадь преимущественно по протяженным понижениям.

Также рассчитаны два индекса, характеризующих картографируемый участок в целом: индекс разнообразия Шеннона (SDI) и индекс выравненности (SEI) (McGarigal and Marks, 1995). Они сочетают в себе оценку двух отдельных аспектов разнообразия: богатства выделов и их равномерности. Богатство выделов относится к количеству различных типов растительного покрова, присутствующих в ландшафте, то есть чем больше типов наземного покрова, тем разнообразнее выдел. Выравненность же характеризует относительную площадь территории, распределенную между различными типами выделов (Dusek and Popelkova, 2017).

Значение индексов растёт, когда увеличивается количество типов выделов (SDI) или справедливость распределения площади между ними (SEI). Индекс разнообразия Шеннона (SDI) является относительной мерой разнообразия участков и будет равен нулю, если территория состоит только из одного выдела, его значение будет расти по мере увеличения количества типов участков. Индекс равномерности Шеннона (SEI) описывает пропорциональность распределения площади среди выделов и варьирует от 0 до 1 (когда распределение типов пятен становится полностью равномерным) (Nagendra, 2022).

Исходя из рассчитанных метрик (табл. 1), картографируемый участок характеризуется достаточно большим разнообразием выделов и высокой равномерностью распределения участков. Значительное разнообразие выделов может быть объяснено, с одной стороны, неоднородностью физико-географических условий картографируемой территории, а с другой — неоднородностью состояния исходных сообществ, в том числе подвергшихся различным видам антропогенной трансформации. Равномерность распределения, вероятно, связана с нивелированием указанных различий под воздействием пирогенного фактора.

Рассчитаны индексы, характеризующие форму и степень фрагментации отдельных типов выделов (табл. 2): ED (Edge Density — индекс плотности краев), характеризующий мозаичность участков различных типов и принимающий значение 0, если имеется только один контур внутри одной категории выделов, и MSI (Mean

Таблица 1. Индексы разнообразия и выровненности, рассчитанные для карты

SDI	SEI
Shannon's Diversity Index	Shannon's Evenness Index
3.31	0.85

Таблица 2. Контуры с наиболее высокой плотностью краев

Растительные ассоциации	ED
Пушицевые и осоково-пушицевые сфагновые с подростом березы	1.29
Багульниково-пушицевые и пушицево-багульниковые сфагновые с подростом березы	1.22
Молиниевые долгомошные с подростом березы	2.69
Рогозовые долгомошные с подростом березы	0.17
Хвощевые долгомошные с подростом березы и ольхи черной	0.69
Осоковые долгомошные с подростом березы	1.02
Осоково-вейниковые и ландышево-вейниковые с подростом березы	3.63
Молиниевое-орляковые с подростом березы	6.91
Молиниевое-вересковые с подростом березы	3.12
Ивовые долгомошные	0.47

Shape Index — индекс формы), отражающий компактность различных типов выделов и принимающий значение 1, если все контуры имеют абсолютно симметричную форму (т. е. форму круга) (Malinowska and Szumacher, 2013).

Установлено, что на всем картографируемом участке самое высокое значение индекса плотности краев имеют выделы с подростом березы из нелесных травяных и кустарничково-травяных ассоциаций, что свидетельствует о большом количестве отдельных участков, занимаемых ими. Как уже отмечалось выше, сообщества с густым подростом березы занимают преобладающую площадь среди всех нелесных сообществ, и высокое значение индекса плотности краев свидетельствует об их широкой, но при этом мозаичной, распространенности по всей территории, пострадавшей от пожара. Самую сложную форму контуров из всех картографируемых единиц (то есть имеющих самые низкие значения индекса формы) имеют сосновые леса, что объясняется как ландшафтными особенностями территории, в частности приуроченностью значительной части сохранившихся сосняков к вершинам и склонам песчаных гряд, так и неравномерностью распределения типов пожаров.

5. Заключение

Картографирование послепожарной растительности является методически сложной задачей из-за динамичности состояния растительного покрова, его мозаичности и схожести спектральных характеристик сообществ. В представленной работе предложены легенда и методический подход, учитывающие эти аспекты и применимые для картографирования состояния растительности иных территорий, испытавших воздействие пожаров.

Полученная крупномасштабная карта отражает распределение растительных сообществ на территории, затронутой различными типами пожара, произошедшего в 2010 г. по состоянию на шестой-седьмой год после пожара. Наибольшую площадь среди сообществ, сохранивших древостой, занимают сосновые леса, широко распространенные на этой части территории заповедника и до пожаров 2010 г. Рассчитанные индексы форм свидетельствуют, что участки сосняков, при значительной общей площади, распределены фрагментарно в пределах территории, пострадавшей от пожара.

давшей от пожара, и приурочены в основном к песчаным грядам. Среди нелесных сообществ по занимаемой площади выделяются с густым подростом березы, равномерно распределенные по всей картографируемой территории.

Заметную роль в структуре послепожарного растительного покрова играют черноольшаники, мало пострадавшие во время пожара из-за высокой обводненности занимаемых ими биотопов, и черноольховые заросли, активно распространяющиеся по понижениям и имеющие потенциал к увеличению занимаемой площади.

Методика составления карты обладает новизной в рамках исследуемой области, а полученная карта имеет заложенный потенциал для обновления и корректировки, необходимых из-за динамичности послепожарного состояния растительности. В перспективе это дает возможность для пространственного анализа динамики восстановления растительности и оценки ее скорости.

Благодарности

Неоценимую помощь в проведении полевых исследований и сборе материалов оказали директор ГПБЗ «Керженский» И. М. Казаков и его сотрудники О. Ю. Гореловская, М. В. Языков, О. В. Кораблева и др., а также М. А. Зарубина и В. А. Землянский.

Литература

- Аверина, И. А. (2001). Пожары на территории Керженского заповедника. *Труды Государственного природного биосферного заповедника «Керженский»*, 1, 404–414.
- Александрова, В. Д. (1969). *Классификация растительности. Обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах*. Л.: Наука.
- Барталев, С. А., Егоров, В. А., Ефремов, В. Ю., Лупян, Е. А., Стыценко, Ф. В., Флитман, Е. В. (2012). Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 9 (2), 9–26.
- Громыко, М. Н. и Смирнова, Е. А. (2002). Стационар для изучения послепожарных сукцессий на гари 1999 г. в кедровых лесах Сихотэ-Алинского заповедника. В: Л. В. Кулешов, ред., *Мониторинг сообществ на гаях и управление пожарами в заповедниках*. М.: ВНИИ природы, 153–157.
- Денисов, А. К. (1979). Лесные пожары в лесном Среднем Заволжье в 1921 и 1972 гг. и их уроки. В: А. К. Денисов, ред., *Горение и пожары в лесу*. Ч. 3. Красноярск: Наука, 20–23.
- Кадетов, Н. Г. (2017). Некоторые аспекты восстановления разнообразия лесных сообществ полесского ландшафта в условиях периодических катастрофических пожаров (на примере Керженского заповедника). В: *International Conference «Landscape Dimensions of Sustainable Development: Science — Planning — Governance»*. Tbilisi: Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 581–591.
- Кадетов, Н. Г. и Гнеденко, А. Е. (2019). Подходы к картографированию пройденных пожаром лесов в условиях заповедного режима. *Географический вестник*, 2 (49), 148–157. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-148-157>
- Кадетов, Н. Г., Астахова, М. А., Урбанавичуте, С. П. (2015). Восстановление лесов Керженского заповедника после пожаров 2010 г. *Антропогенная трансформация природной среды*, 1, 91–94.
- Комарова, Т. А., Прохоренко, Н. Б., Глушко, С. Г., Терехина, Н. В. (2017). *Послепожарные сукцессии в леса Сихотэ-Алиня с участием Pinus koraiensis Siebold et Zucc. Методологические положения и методические подходы в их изучении*. СПб.: Свое издательство.
- Константинов, А. В. (2004). *Жаровой лес*. Н. Новгород: ННГУ.
- Кораблёв, О. Л. (2001). История заселения территории заповедника и топонимика населенных пунктов. *Труды Государственного природного биосферного заповедника «Керженский»*, 1, 389–403.
- Кулешова, Л. В. (2002). Опыт комплексного мониторинга лесных сообществ на гаях 1972 года в Окском заповеднике. В: Л. В. Кулешов, ред., *Мониторинг сообществ на гаях и управление пожарами в заповедниках*. М.: ВНИИ природы, 6–35.

- Кулешова, Л. В., Ильина, Л. В., Потапова, Н. А., Яновицкая, Т. П. (1984). Стационарные наблюдения за динамикой сообществ в заповедниках: комплекс методов и сопряженный анализ. В: *Исследования в области заповедного дела: сб. науч. тр.* М.: ВНИИ охраны природы и заповедного дела МСХ СССР, 71–91.
- Лавренко, Е. М. (1961). Основные закономерности растительных сообществ и пути их изучения. В: Е. М. Лавренко, ред., *Полевая геоботаника*. М.; Л.: АН СССР, 13–75.
- Попов, С. Ю. (2010). Структура и динамика растительности Керженского заповедника. В: *Труды Государственного природного биосферного заповедника «Керженский»*. Т. 4. Нижний Новгород: [б. и.].
- Рожков, Ю. Ф. и Кондакова, М. Ю. (2019). Оценка динамики восстановления лесов после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 4 (1), 1–10. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.014>
- Садков, С. А. (2015). Создание карты типов возгораний методом полуавтоматического дешифрирования снимков высокого и сверхвысокого разрешения на примере Керженского заповедника (Нижегородская область). *Исследование Земли из космоса*, 1, 53–64.
- Садков, С. А. и Козлов, Д. Н. (2014). Крупномасштабная ландшафтная карта Керженского заповедника. *Труды Государственного природного биосферного заповедника «Керженский»*, 6, 8–54.
- Сандлерский, Р. Б. (2017). Картографирование динамики ландшафтного покрова на юге Валдайской возвышенности по данным дистанционного зондирования. В: *Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития*. Т. 1. Тюмень: ТюмГУ, 163–167.
- Слинкина, О. А., Сухинин, А. И., Буряк, Л. В. (2008). Картографирование текущего состояния лесов Красноярского края с использованием данных дистанционного зондирования. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева*, 1, 70–74.
- Сукачев, В. Н. и Зонн, С. В. (1961). *Методические указания к изучению типов леса*. М.: АН СССР.
- Шенников, А. П. (1964). *Введение в геоботанику*. Л.: ЛГУ.
- Шинкаренко, С. С., Иванов, Н. М., Берденгадиева, А. Е. (2021). Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока Европейской России. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 6 (3), 23–44. <https://doi.org/10.24189/ncr.2021.035>
- Шугаев, Н. И., Хапугин, А. А., Варгот, Е. В. (2015). Анализ первых изменений растительного покрова лесов Мордовского заповедника после пожаров 2010 года. *Труды Мордовского ГПЗ им. Н. Г. Смидовича*, 14, 396–407.
- Ярмишко, В. Т. и Лянгузова, И. В. (2002). *Методы изучения лесных сообществ*. СПб.: НИИ химии СПбГУ.
- Botequilha-Leitao, A., Miller, J., Ahern, J. (2006). *Measuring Landscapes: A planner's handbook*. Washington: Island Press.
- Bousquet, E., Mialon, A., Rodriguez-Fernandez, N., Mermoz, S., Kerr, Y. (2022). Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing. *Biogeosciences*, 19, 3317–3336. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3317-2022>
- Cheng, Ch.-Ch. and Jan, J.-F. (2000). Application of GIS to measure and evaluate landscape changes. In: *ACRS 2000: 21st Asian Conference on Remote Sensing*. Vol. 2. Taipei: Center for Space & Remote Sensing Research, 282–288.
- Dusek, R. and Popelkova, R. (2017). Theoretical view of the Shannon index in the evaluation of landscape diversity. *AUC Geographica*, 47 (2), 5–13. <https://doi.org/10.14712/23361980.2015.12>
- Ibarrola-Ulzurruna, E., Gonzalo-Martin, C., Marcello, J. (2017). Influence of pansharpening in obtaining accurate vegetation maps. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43 (6), 528–544. <https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1371583>
- Kadetov, N., Gnedenko, A., Gatina, E. (2021). Mapping of post-fire forest dynamics in the central part of European Russia. *Science and Global Challenges of the 21st Century — Science and Technology*, 342, 144–152. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89477-1_14
- Malinowska, E. and Szumacher, I. (2013). Application of landscape metrics in the evaluation of geodiversity. *Miscellanea Geographica — Regional Studies on Development*, 17 (4), 28–33. <https://doi.org/10.2478/v10288-012-0045-y>
- McGarigal, K. and Marks, B. J. (1995). *Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. Portland: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- McGarigal, K., Cushman, S., Maile, E. (2002). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps*. Amherst: University of Massachusetts.

- Mitri, G.H. and Gitas, I.Z. (2013). Mapping post-fire forest regeneration and vegetation recovery using a combination of very high spatial resolution and hyperspectral satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 20, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.001>
- Nagendra, H. (2022). Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 22 (2), 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00002-4)
- Novo, A., Gonzalez, H., Martinez-Sanchez, J., Lorenzo, H. (2020). Remote sensing approach to evaluate post-fire vegetation structure. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Nice: ISPRS, 1031–1038. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-III-B3-2020-1031-2020>
- Perez-Cabello, F., Montorio, R., Alves, D. B. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100251. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251>
- Pickell, P. D., Hermosilla, T., Frazier, J. R., Coops, N. C., Wulder, M. A. (2016). Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 138–149. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1126375>
- Senf, C. and Seidl, R. (2021). Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4, 63–70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>
- Szapkowski, M. D. and Jensen, J. L. R. (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing*, 11 (22), 2638. <https://doi.org/10.3390/rs11222638>
- Valero, M. J. A. and Alzate, A. B. E. (2019). Comparison of maximum likelihood, support vector machines, and random forest techniques in satellite images classification. *Tecnura*, 23 (59), 13–26. <https://doi.org/10.14483/22487638.14826>

Статья поступила в редакцию 7 июня 2024 г.

Статья рекомендована к печати 18 сентября 2024 г.

Информация об авторах:

Гнеденко Ангелина Евгеньевна — <https://orcid.org/0000-0002-2060-9070>, gnedenko.a.e@igras.ru

Кадетов Никита Геннадьевич — <https://orcid.org/0000-0002-1214-5608>, biogeonk@mail.ru

Урбанавичуте Светлана Пранасовна — spurban@mail.ru

Map of post-fire vegetation of the Kerzhensky Nature Reserve*

A. E. Gnedenko¹, N. G. Kadetov², S. P. Urbanavichute³

¹ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 199991, Russian Federation

³ State Nature Biosphere Reserve “Kerzhensky”,
23, ul. Rozhdestvenskaya, Nizhny Novgorod, 603001, Russian Federation

For citation: Gnedenko, A. E., Kadetov, N. G., Urbanavichute, S. P. (2024). Map of post-fire vegetation of the Kerzhensky Nature Reserve. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (4), 716–733. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.406> (In Russian)

The territory of the Trans-Volga region has repeatedly experienced the impact of catastrophic forest fires, the last of which occurred in 2010. On the territory of the Kerzhensky Nature Reserve, since 2011, monitoring of post-fire vegetation restoration has been carried out on permanent sample plots, and in 2014, work began on compiling a map of the territory traversed

* The research was funded by the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0007 (1021051703468-8) “Biotic, geographical, hydrographic and landscape environmental assessments for creating the foundations of rational use of natural resources” and the Moscow University Development Program (no. 1220).

by the fire. Mapping the post-fire state of vegetation is fraught with great difficulties due to the mosaic nature of the contours of plant communities. Was compiled a large-scale (1 : 50 000) map of vegetation for the part of the Kerzhensky Nature Reserve that was damaged by the fire in 2010. The methodology is based on an annual ground survey of key areas and interpretation of satellite images with subsequent refinement of contours. The work used Landsat-8 satellite images for preliminary interpretation of vegetation and determination of geobotanical description points, as well as Spot-5 satellite images when compiling the final map section. A total of 600 geobotanical descriptions were compiled and used as standards for interpretation. It has been established that the largest areas in the area affected by the fire are occupied by pine grass and shrub-herbaceous forests, which represent a kind of “basic” syntaxon for forest restoration after fires. Among non-forest communities, a significant role is played by associations with dense birch undergrowth — sedge-reed and lily-of-the-valley-reed, as well as molinia-bracken. A special place in the structure of the vegetation cover is occupied by black alder forests, largely preserved due to the relatively high water content, and also by black alder thickets, spreading along extended depressions. Spatial metrics indicate a wide variety of patches and a high uniformity of their distribution within the mapped territory, which may be due to the influence of the pyrogenic factor. The structure of the legend developed for the presented map takes into account the dynamic aspect of the post-fire state of vegetation and can be used not only for subsequent refinement of the map, but also for mapping other territories that have experienced pyrogenic impact.

Keywords: forest fires, interpretation, vegetation map, satellite images, Kerzhensky Nature Reserve.

References

- Alexandrova, V.D. (1969). *Vegetation classification. Review of classification principles and classification systems in different geobotanical schools*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Averina, I. A. (2001). Fires on the territory of the Kerzhensky Nature Reserve. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika “Kerzhenskii”*, 1, 404–414. (In Russian)
- Bartalev, S. A., Egorov, V. A., Efremov, V. Yu., Lupyan, E. A., Stytsenko, F. V., Flitman, E. V. (2012). Estimation of the area of fires based on the integration of satellite data of various spatial resolutions MODIS and Landsat-TM/ETM+. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 9 (2), 9–26. (In Russian)
- Botequilha-Leitao, A., Miller, J., Ahern, J. (2006). *Measuring Landscapes: A planner’s handbook*. Washington: Island Press.
- Bousquet, E., Mialon, A., Rodriguez-Fernandez, N., Mermoz, S., Kerr, Y. (2022). Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing. *Biogeosciences*, 19, 3317–3336. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3317-2022>
- Cheng, Ch.-Ch. and Jan, J.-F. (2000). Application of GIS to measure and evaluate landscape changes. In: *ACRS 2000: 21st Asian Conference on Remote Sensing*. Vol. 2. Taipei: Center for Space & Remote Sensing Research, 282–288.
- Denisov, A. K. (1979). Forest fires in the forests of the Middle Trans-Volga region in 1921 and 1972 and their lessons. In: A. K. Denisov, ed., *Gorenie i pozhary v lesu*. Pt 3. Krasnoyarsk: Nauka Publ., 20–23. (In Russian)
- Dusek, R. and Popelkova, R. (2017). Theoretical view of the Shannon index in the evaluation of landscape diversity. *AUC Geographica*, 47 (2), 5–13. <https://doi.org/10.14712/23361980.2015.12>
- Gromyko, M. N. and Smirnova, E. A. (2002). Permanent monitoring station for study of afterfire successions on burned (1999) sites in pine (Siberian) forests in Sikhote-Alinsky strict nature reserve. In: L. V. Kuleshov, ed., *Monitoring soobshchestv na gariakh i upravlenie pozharami v zapovednikakh*. Moscow: VNII prirody Publ., 153–157. (In Russian)
- Ibarrola-Ulzurruna, E., Gonzalo-Martin, C., Marcello, J. (2017). Influence of pansharpening in obtaining accurate vegetation maps. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43 (6), 528–544. <https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1371583>

- Kadotov, N. G. (2017). Some aspects of restoring the diversity of forest communities in the Polesie landscape under conditions of periodic catastrophic fires (using the example of the Kerzhensky Nature Reserve). In: *Proceedings of the International Conference "Landscape Dimensions of Sustainable Development: Science — Planning — Governance"*. Tbilisi: Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 581–591. (In Russian)
- Kadotov, N. G. and Gnedenko, A. E. (2019). Approaches to mapping forests affected by fire under protected conditions. *Geographical Bulletin*, 2 (49), 148–157. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-148-157> (In Russian)
- Kadotov, N. G., Astakhova, M. A., Urbanavichute, S. P. (2015). Restoration of forests of the Kerzhensky Reserve after the fires of 2010. In: *Antropogennaia transformatsiia prirodnoi sredy*, 1, 91–94. (In Russian)
- Kadotov, N., Gnedenko, A., Gatina, E. (2021). Mapping of post-fire forest dynamics in the central part of European Russia. *Science and Global Challenges of the 21st Century — Science and Technology*, 342, 144–152. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89477-1_14
- Komarova, T. A., Prokhorenko, N. B., Glushko, S. G., Terekhina, N. V. (2017). *Post-fire succession in Sikhote-Alin forests with Pinus koraiensis Siebold et Zucc. Methodological principles and methodical approaches in their study*. St. Petersburg: Svoe izdatelstvo Publ. (In Russian)
- Konstantinov, A. V. (2004). *Heat forest*. Nizhny Novgorod: NNGU Publ. (In Russian)
- Korablev, O. L. (2001). History of settlement of the reserve territory and toponymy of settlements. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika "Kerzhenskii"*, 1, 389–403. (In Russian)
- Kuleshova, L. V. (2002). Experience of complex monitoring of forest communities on burned (1972) sites in Oksky strict nature reserve. In: L. V. Kuleshova, ed., *Monitoring soobshchestv na gariakh i upravlenie pozharemi v zapovednikakh*. Moscow: VNII prirody Publ., 6–35. (In Russian)
- Kuleshova, L. V., Ilyina, L. V., Potapova, N. A., Yanovitskaya, T. P. (1984). Stationary observations of the dynamics of communities in nature reserves: a set of methods and associated analysis. In: *Issledovaniia v oblasti zapovednogo dela: sbornik nauchnykh trudov*, 71–91. (In Russian)
- Lavrenko, E. M. (1961). Basic patterns of plant communities and ways of studying them. In: E. M. Lavrenko, ed., *Polevaia geobotanika. Vol. 1*. Moscow; Leningrad: AN SSSR Publ., 13–75. (In Russian)
- Malinowska, E. and Szumacher, I. (2013). Application of landscape metrics in the evaluation of geodiversity. *Miscellanea Geographica — Regional Studies on Development*, 17 (4), 28–33. <https://doi.org/10.2478/v10288-012-0045-y>
- McGarigal, K., Cushman, S., Maile, E. (2002). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps*. Massachusetts, Amherst.
- McGarigal, K. and Marks, B. J. (1995). *Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. Portland: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Mitri, G. H. and Gitas, I. Z. (2013). Mapping post-fire forest regeneration and vegetation recovery using a combination of very high spatial resolution and hyperspectral satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 20, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.001>
- Nagendra, H. (2022). Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 22 (2), 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00002-4)
- Novo, A., Gonzalez, H., Martinez-Sanchez, J., Lorenzo, H. (2020). Remote sensing approach to evaluate post-fire vegetation structure. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Nice: ISPRS, 1031–1038. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-B3-2020-1031-2020>
- Perez-Cabello, F., Montorio, R., Alves, D. B. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100251. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251>
- Pickell, P. D., Hermosilla, T., Frazier, J. R., Coops, N. C., Wulder, M. A. (2016). Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 138–149. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1126375>
- Popov, S. Yu. (2010). Structure and dynamics of vegetation of the Kerzhensky Nature Reserve. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika "Kerzhenskii"*. Vol. 4. Nizhniy Novgorod: [s. n.]. (In Russian)
- Rozhkov, Yu. F. and Kondakova, M. Yu. (2019). Assessment of the dynamics of forest restoration after fires in the Olekminsky Nature Reserve (Russia) using Landsat satellite images. *Nature Conservation Research*, 4 (1), 1–10. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.014> (In Russian)

- Sadkov, S. A. and Kozlov, D. N. (2014). Large-scale landscape map of the Kerzhensky Nature Reserve. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika "Kerzhenskii"*, 6, 8–54. (In Russian)
- Sadkov, S. A. (2015). Creating a map of fire types using the method of semi-automatic interpretation of high and ultra-high-resolution images using the example of the Kerzhensky Nature Reserve (Nizhny Novgorod region). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1, 53–64. (In Russian)
- Sandlersky, R. B. (2017). Mapping the dynamics of landscape cover in the south of the Valdai Upland using remote sensing data. *Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support for environmental management and sustainable development*. Vol. 1. Tyumen: TiumGU Publ., 163–167. (In Russian)
- Senf, C. and Seidl, R. (2021). Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4, 63–70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>
- Shennikov, A. P. (1964). *Introduction to geobotany*. Leningrad: Leningrad University Press. (In Russian)
- Shinkarenko, S. S., Ivanov, N. M., Berdengalieva, A. E. (2021). Spatiotemporal dynamics of burned areas in federal protected areas in the southeast of European Russia. *Nature Conservation Research*, 6 (3), 23–44. <https://doi.org/10.24189/ncr.2021.035> (In Russian)
- Shugaev, N. I., Khapugin, A. A., Vargot, E. V. (2015). Analysis of the first changes in the vegetation cover of the forests of the Mordovsky Nature Reserve after the fires of 2010. *Trudy Mordovskogo GPZ imeni N. G. Smidovicha*, 14, 396–407. (In Russian)
- Slinkina, O. A., Sukhinin, A. I., Buryak, L. V. (2008). Mapping the current state of forests in the Krasnoyarsk Territory using remote sensing data. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva*, 1, 70–74. (In Russian)
- Sukachev, V. N. and Zonn, S. V. (1961). *Guidelines for the study of forest types*. Moscow: Akademiia nauk SSSR Publ. (In Russian)
- Szpakowski, M. D. and Jensen, J. L. R. (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing*, 11 (22), 2638. <https://doi.org/10.3390/rs11222638>
- Valero, M. J. A. and Alzate, A. B. E. (2019). Comparison of maximum likelihood, support vector machines, and random forest techniques in satellite images classification. *Tecnura*, 23 (59), 13–26. <https://doi.org/10.14483/22487638.14826>
- Yarmishko, V. T. and Lyanguzova, I. V. (2002). *Methods for studying forest communities*. St. Petersburg: NII khimii SPbGU Publ. (In Russian)

Received: June 7, 2024
Accepted: September 18, 2024

Authors' information:

Angelina E. Gnedenko — <https://orcid.org/0000-0002-2060-9070>, gnedenko.a.e@igras.ru
Nikita G. Kadetov — <https://orcid.org/0000-0002-1214-5608>, biogeonk@mail.ru
Svetlana P. Urbanavichute — spurban@mail.ru