

Мониторинг влияния рекреации на растительный покров с помощью беспилотного летательного аппарата на примере горы Стрельная (Самарская область)

О.А. Белова¹, А.Ю. Денисова¹, Н.В. Власова¹, Л.М. Кавеленова¹, Е.С. Корчиков¹,
В.А. Федосеев¹, Т.Ф. Чап²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34А, Самара, Россия, 443086

²Жигулевский государственный заповедник имени И.И. Спрыгина, Жигулёвск, Россия, 445362

Аннотация. В Жигулевском государственном заповеднике одним из объектов, максимально подверженных рекреационной нагрузке, является гора Стрельная. Проводимые сотрудниками университета мониторинговые исследования рекреационной нагрузки до последнего времени ограничивались либо осмотром растительных сообществ с установленного на тропе металлического настила, либо спуском на поверхность склона и перемещением по нему с риском травмировать уязвимый растительный покров. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открывает новые перспективы для быстрого и эффективного выявления затронутых рекреационным воздействием точек, в том числе удаленных от настила, без контакта с поверхностью склона. Первый опыт интеграции наземного и проводимого с помощью БПЛА мониторинга был осуществлен в 2019 г. Была произведена съемка горы Стрельной весной и осенью с использованием БПЛА. Полученные снимки были проклассифицированы с помощью метода опорных векторов с радиальными базисными функциями на классы «тропа» и «не тропа». В результате удалось автоматически выделить вытопанные участки склона с большой долей точности. В статье представлены результаты проведенной работы.

1. Введение

Интерес к объектам живой природы, в том числе приуроченным к особо охраняемым территориям различного статуса, демонстрирует рост в различных странах мира. Особо охраняемые территории характеризуются насыщенностью объектами природного наследия, что делает их важными в аспекте сохранения биологического разнообразия и иных ценных компонентов природы. Это обстоятельство налагает ограничения на формы организации экологического туризма, связанные с упреждающим планированием охранительных мер [1].

При сравнительно небольших абсолютных значениях высоты и площади Жигулевских гор здесь в достаточной мере прослеживается присущая горным экосистемам мозаичность растительных сообществ, гораздо слабее – вертикальная зональность. Совокупность природных комплексов в границах Жигулевского государственного заповедника имени И.И. Спрыгина включает в себе уникальную совокупность видов растений, животных, лишайников, в том числе эндемиков и реликтов. В частности, из 1022 видов сосудистых растений флоры

заповедника особое научное значение имеют 178 видов, в том числе эндемики – 27 (5 узких эндемиков Жигулей), реликты – 46, включены в Красную книгу – 17, описаны впервые с территории заповедника – 16 видов и 5 разновидностей [2]. Здесь достоверно установлено присутствие 229 видов птиц (около 80% видов орнитофауны Самарской области), 150 регулярно встречаются на территории и у границ заповедника. В фауне млекопитающих заповедника представлены 48 видов, принадлежащих к 6 отрядам, 15 семействам и 34 родам (около 63% числа видов млекопитающих Самарской области). Фауна беспозвоночных заповедника включает более 7 тысяч видов, среди которых 14 видов признаны редкими и включены в «Красную книгу Российской Федерации», 120 видов – в Красную книгу Самарской области [3, 4].

В Жигулевском государственном заповеднике одним из объектов, в наибольшей степени подверженных рекреационной нагрузке, является гора Стрельная. Высокая природоохранная ценность Стрельной горы определяется тем, что здесь представлено почти все фитоценоотическое и флористическое разнообразие каменистых степей - реликтовых сообществ Жигулей, к которым примыкают горные дубравы и сосняки. Начиная с 50-х годов XX века, на горе Стрельной сформировалась дорожно-тропиночная сеть, связанная с добычей нефти в Жигулях в военные годы. С 1966 года в воссозданном заповеднике было введено ограничение свободного посещения горы, стало практикой проведение познавательных экскурсий для туристов, с этого времени здесь действует экскурсионный маршрут. По данным многолетних исследований сотрудников Жигулевского заповедника (1983-2008 гг.), проводившихся в зоне пешеходной части маршрута, в результате рекреационного воздействия природные сообщества претерпели заметную трансформацию и деградацию: расширилась тропиночная сеть, на обзорной площадке увеличилась площадь выбитых участков, на склонах вдоль тропы уничтожен почвенно-растительный покров, произошли значительные изменения в составе и структуре сообществ.

В последние десятилетия, когда значительно усилился интерес населения к посещению уникальных мест природного наследия, не только национальные парки, согласно статусу реализующие деятельность в области экологического туризма [5], но и государственные заповедники поставлены перед необходимостью организации регулируемого посещения их территории с учетом допустимой рекреационной нагрузки и при минимизации ущерба природным сообществам. В 2012 году был установлен металлический настил с перилами, который расширяется на втором каменистом склоне в виде обзорной площадки, где имеются информационные аншлаги. На вершине горы настил образует большую смотровую площадку, которая поднята на опорах перед шиханом на высоту, превышающую высоту вершины (рисунок 1). Этот настил ограничил возможность хождения посетителей по горным склонам. Начиная с 2013 г., по заданию Жигулевского государственного заповедника специалисты кафедры экологии, ботаники и охраны природы Самарского университета проводят мониторинговые исследования с целью выявления возможных изменений в экосистемах после обустройства экскурсионной тропы.

Кратко охарактеризуем изменения характера рекреационной нагрузки, которые прослеживаются с момента ее эксплуатации как эколого-туристического объекта. Экскурсионный настил должен был минимизировать негативное воздействие рекреации на природные экосистемы при существенном росте принимаемого потока экскурсантов, а естественное зарастание в ходе самовосстановления растительных группировок, как ожидалось, должно было восстановить растительный покров на нарушенных в ходе строительства настила участках. Мониторинговые исследования имеют своей целью установить, происходит ли в должной мере восстановление нарушенного ранее (при существовании пешеходной тропы или в период строительства настила) растительного покрова, какие виды являются участниками этого восстановления, и выполняет ли в полной мере настил свои природоохранные функции.



Рисунок 1. Общий вид участков современной экскурсионной тропы на г. Стрельной.

Осуществление наземных мониторинговых исследований на научном стационаре (НС) г. Стрельной позволило выявить базовый список видов сосудистых растений, которые формируют растительные ассоциации, а также видов-рудералов. Растительный покров, нарушенный в процессе строительства настила, восстанавливается под настилом за счет разрастания особей, располагающихся вблизи настила, и развития образовавшихся всходов. Увеличилась степень вытаптывания. Спрыгивая с настила перед опорами смотровой площадки, посетители разбивают субстрат и уничтожают растения, нарушение связности субстрата провоцирует усиление смыва грунта дождевыми и тальными водами. На месте удаленных с субстрата вытаптыванием горно-степных многолетников отмечено внедрение различных растений-рудерантов.



Рисунок 2. Предупреждающая табличка на настиле и нарушение правил поведения посетителями – выход экскурсантов на шихан.

Фиксируя визуально состояние растительного покрова на пробных площадях НС в ходе полевых обследований, мы установили, что в результате хронического нарушения правил поведения на экскурсионной тропе происходит как появление новых тропинок по сторонам от экскурсионного настила, так и расширение уже существовавших. Параллельно с появлением новых пешеходных троп вдоль настила, происходит зарастание и исчезновение потерявших привлекательность для посетителей тропинок, однако перемещение по склону стало пространственно более выражено. Восстановление ранее нарушенных растительных сообществ происходит однозначно там, где находятся недоступные для посетителей участки – под настилом. Виды, участвующие в возобновлении нарушенных участков растительного покрова, обнаруживают чередование своего присутствия и обилия, что можно считать отражением особенностей развития их ценопопуляций. Посетители экскурсионного маршрута все активнее используют для селфи и мини-пикников шихан за видовой площадкой. Нагрузка на него в последний год стала выше, чем это было до устройства настила (рисунок 2).

2. Использование БПЛА в мониторинге влияния рекреационной нагрузки на состояние растительного покрова на г. Стрельной

Как известно, мониторинг растительности традиционно основан на полевых обследованиях. При детальности (высоком пространственном разрешении, фактически с охватом единичных экземпляров растений на пробных площадях) и высокой значимости получаемой информации, полевые обследования всегда имеют ограниченную территорию охвата, большую при маршрутных, гораздо меньшую – при использовании долговременных стационарных площадок. Результаты частных полевых обследований не всегда позволяют точно экстраполировать информацию на весь ландшафт, особенно если объекты, представляющие интерес, распределены неравномерно. Еще одним недостатком использования традиционных полевых исследований является то, что они требуют значительных затрат времени и усилий для охвата больших территорий [6].

Напротив, методы, основанные на дистанционном зондировании (ДЗЗ), обеспечивают сбор данных в больших пространственных пределах и менее трудоемки, чем традиционные полевые исследования. Различные оптические системы (IKONOS, Quickbird, RapidEye и др), обеспечивают изображения с очень высоким разрешением менее пяти метров на пиксель [7, 8]. Тем не менее, многие продукты ДЗЗ очень дороги для получения, в то время как бесплатные данные, доступные из серии спутников NASA Landsat и миссий Sentinel Европейского космического агентства, имеют невысокое пространственное разрешение и, следовательно, ограничиваются, например, изменениями земного покрова и картированием среды обитания [9, 10].

Неявное противоречие между возможностями материалов ДЗЗ и потребностями детализации картины природных экосистем может быть в определенных отношениях устранено благодаря появлению нового сегмента дистанционного зондирования – малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), или дронов, которые изначально разрабатывались и использовались в военной и оборонной промышленности. Их развитие, по мнению специалистов, привело к появлению так называемой дронасферы [11], пространства между уровнями пилотируемой воздушной активности и поверхностью земли. Границы дронасферы в настоящее время зависят от технических характеристик и правил, но они обычно включают в себя непосредственную близость к земле. В настоящее время быстрое развитие БПЛА делает их все более доступными для множества исследовательских целей. В частности, данные, полученные с помощью БПЛА, могут предоставить цифровые изображения без облаков и с очень высоким разрешением для мониторинга растительности на уровне ландшафта или определения характеристик мелкомасштабных ландшафтов [12]. Имеется опыт мониторинга с помощью съемки с БПЛА популяций охраняемых растений [13].

Мониторинг рекреационной нагрузки на горе Стрельной, проводимый в течение ряда лет, в его наземном осуществлении ограничивается либо осмотром исполнителями растительных сообществ с настила, что позволяет оценить состояние популяций растений в непосредственной близости от него, либо спуском на поверхность склона и перемещением по нему с риском травмировать уязвимые растительный покров и тонкий слой почвы на щебенчатом субстрате. Использование БПЛА открывает новые перспективы для дистанционного, эффективного и быстрого выявления затронутых рекреационным воздействием точек, в том числе удаленных от настила, без контакта с поверхностью склона. В 2019 году (рисунок 3) были проведены пробные весенняя и осенняя съемка горы Стрельной с помощью БПЛА.

Съемка производилась с помощью летательного аппарата Phantom 4 PRO. Характеристики камеры – 3 оптического диапазона RGB, разрешение зависит от высоты съемки: для весенних снимков разрешение составляет 0.0107м/пиксел, для осенних – от 0.019 до 0.037 м/пиксел (территория была снята тремя пролетами). Кадры одного пролета совмещались программой DroneDeploy – программное обеспечение для беспилотников, предназначенное для автоматической обработки получаемых данных. Далее, пролеты между собой были совмещены в полуручном режиме в программе ScanEx Image Processor v 4.2. Полученные снимки представляют собой: весной территорию площадью примерно 2700 м², осенью – территорию

площадью 88600 м². Перепад высот составлял несколько десятков метров от высоты горы Стрельной – 351 м над уровнем моря.

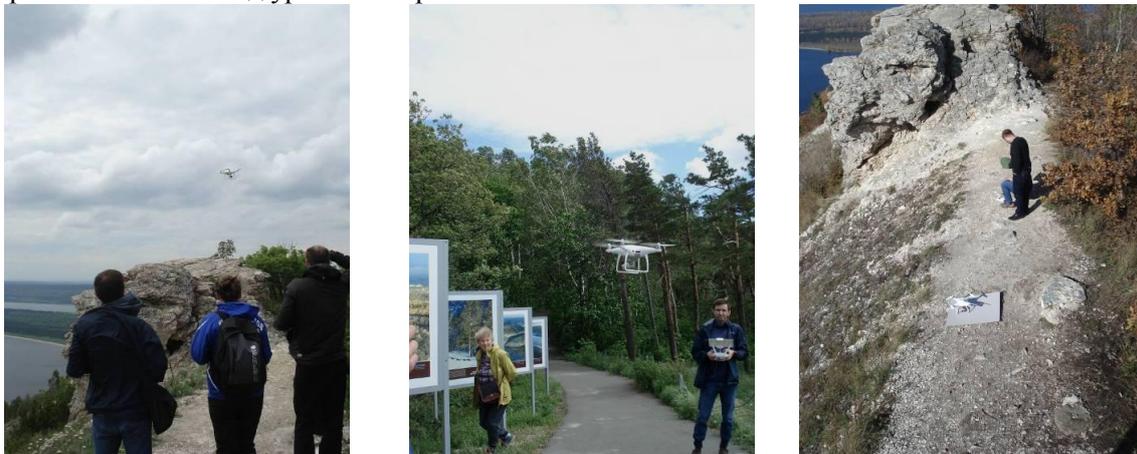


Рисунок 3. Проведение пробных съемок экскурсионного маршрута на г. Стрельной и прилегающих участков склона с использованием БПЛА (27 мая, 3 октября 2019 г.).

Полученные снимки (рисунок 4) были проанализированы на предмет возможности автоматического выделения несанкционированных тропинок.



Рисунок 4. Снимки с БПЛА горы Стрельной (слева направо): снимок 27 мая 2019 г., снимок 3 октября 2019 г.

3. Классификация троп на основе метода опорных векторов с радиальными базисными функциями

Исследование по классификации троп было проведено с помощью метода опорных векторов с радиальными базисными функциями (Support Vector Machines with Radial Basis Functions – SVM RBF) в программной среде Matlab R2017b. Данный алгоритм является управляемым алгоритмом классификации и позволяет производить классификацию на два класса с высокой степенью точности даже при линейной неразделимости классов.

Классификация осуществлялась на классы «тропа» и «не тропа» при вероятности возможных выбросов в обоих классах равной 0,3. Обучающая выборка для обоих классов составлялась из небольших фрагментов фона, представленных для класса «не тропа» травой, деревьями и настилом экскурсионного маршрута. Для класса «тропа» обучающая выборка была представлена участками известковой почвы без травы. Известковая порода, являющаяся основой почвы в исследуемой местности, позволяет хорошо визуальнo отличать тропу от окружающего фона по яркости в RGB диапазоне, поэтому в качестве признаков было выбрано локальное среднее по RGB каналам изображения в окне 3×3. Необходимость усреднения вызвана необходимостью подавления шумов на изображении перед классификацией.

Для обучающей выборки использовались фрагменты обоих изображений, полученных для анализируемого участка интереса в мае и октябре. В связи с различными погодными условиями и освещенностью сцены, а также с различиями спектральных отражательных свойств растительности в различных фенологических фазах (рост в мае и старение в октябре), для обучения и классификации использовались нормализованные признаки с нулевым средним и единичной дисперсией, что позволяет снизить влияние различных диапазонов яркости по каналам. Объем обучающей выборки для класса «тропа» составил 7681 пиксель, из которых 1180 относится к классу «тропа», а 6501 относится к классу «не тропа». Пример изображения диаграммы рассеяния признаков для обучающей выборки приведён на рисунке 5.

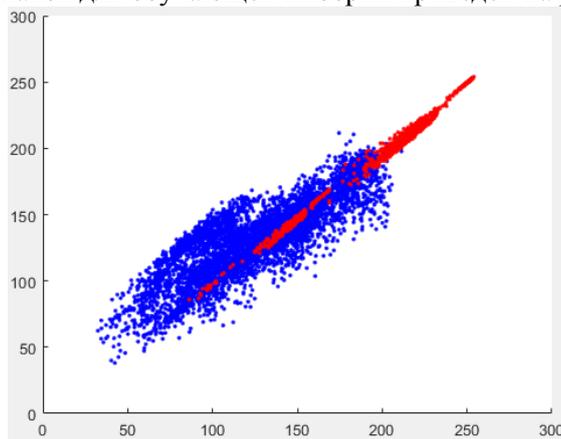


Рисунок 5. Диаграмма рассеяния для классов: «тропа» - красные точки, «не тропа» - синие точки.

Для обучения и классификации использовались изображения, полученные с помощью БПЛА в результате прореживания их в 8 раз. Необходимость снижения пространственного разрешения связана с избыточностью исходных данных как в плане оценки формы тропы, так и в плане высокой вычислительной сложности их обработки. Параметры прореживания были подобраны как максимальные, при которых на исходном изображении тропы являются визуально различимыми.

Тестирование классификатора производилось на участках тропы различной ширины, извлеченных из обоих снимков. Результаты классификации для одного из участков приведены на рисунке 6.

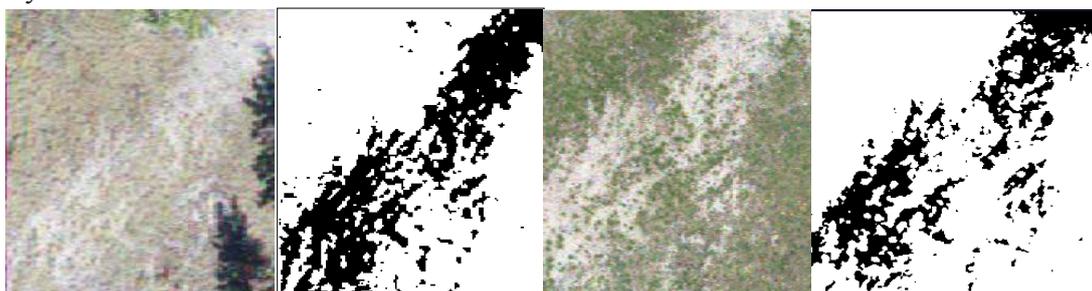


Рисунок 6. Результат классификации «тропы» на фоне травы и деревьев (слева на право): осенний снимок, результат классификации осеннего снимка, весенний снимок, результат классификации весеннего снимка.

Можно заметить, что на весеннем снимке больше участков с растительностью в пределах тропы, а на осеннем снимке тропа стала более вытоптанной. Это подтверждает предположение об использовании этого участка склона для несанкционированного посещения.

Сравнение результатов классификации с эталонами, выделенными экспертами показало, что выделенные классификатором участки в целом совпадают с «тропами», отмеченными вручную. Результат работы классификатора и сравнение с экспертной оценкой приведены на рисунке 7.

Автоматически выделяется территория «тропы» шире экспертной, что говорит о высокой чувствительности метода. В целом для оценки результатов было предложено использовать меру сходства - количество точек «тропы», найденных классификатором, в процентах, что можно выразить формулой (1).

$$Efficiency = \frac{S_{авт} \cap S_{экс}}{S_{экс}}, \quad (1)$$

где $S_{авт}$ - количество точек «тропы», найденных классификатором, а $S_{экс}$ - количество точек «тропы», отмеченной экспертом.

В итоге результативность метода составляет 87,5%.

Финальный эксперимент включал в себя классификацию полного изображения интересующего участка территории на классы «тропа» и «не тропа». В результате было получено, что алгоритм SVM-RBF позволяет при использовании простых яркостных признаков в RGB каналах выделить тропы на фоне травянистой растительности, как на осенних снимках, так и на весенних. Однако, дополнительно в класс «тропа» классифицируются также и оголенные участки склонов, имеющие такой же известковый тип почвы, как и у троп. Таким образом, для дальнейшего анализа характеристик и форм обнаруживаемых троп необходим морфологический анализ полученных изображений.

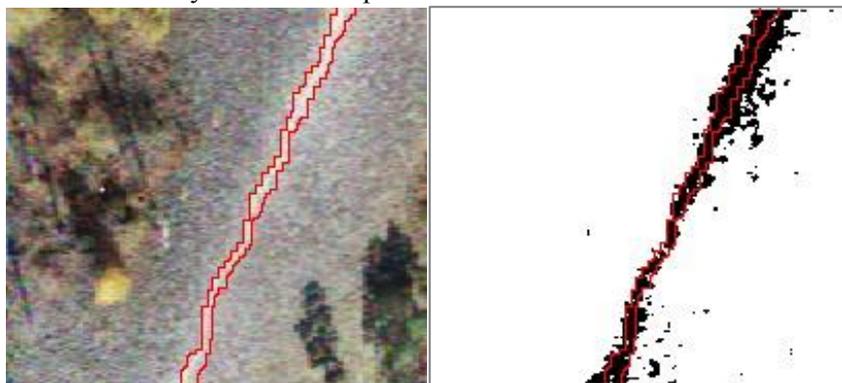


Рисунок 7. Сравнение результата классификации «тропы» с эталоном (слева на право): снимок с выделенной «тропой», результат классификации снимка с наложенной маской «тропы».

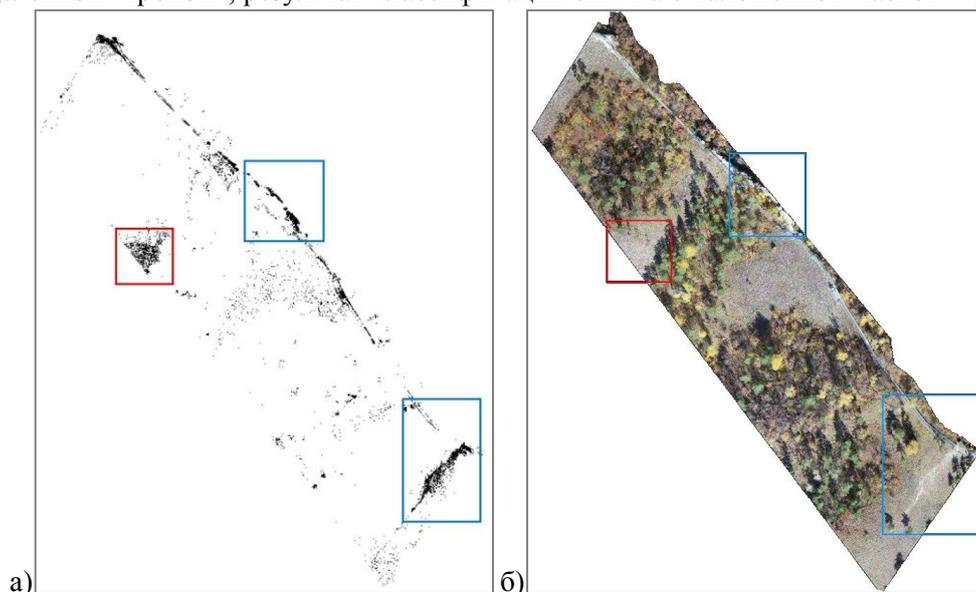


Рисунок 8. Классификация троп: а) результат классификации, б) осенний снимок, полученный с БПЛА. В красном квадрате отмечен ложно выделенный склон с известковой почвой и малым проективным покрытием растительности. В синих квадратах – наиболее крупные из боковых троп вдоль экскурсионного маршрута.

Результаты классификации для весеннего и осеннего снимков показаны на рисунках 8-9. Заметим, что сам настил экскурсионного маршрута, как тропа не классифицируется, поскольку сделан из металла и имеет другие спектральные отражательные характеристики в RGB диапазоне.

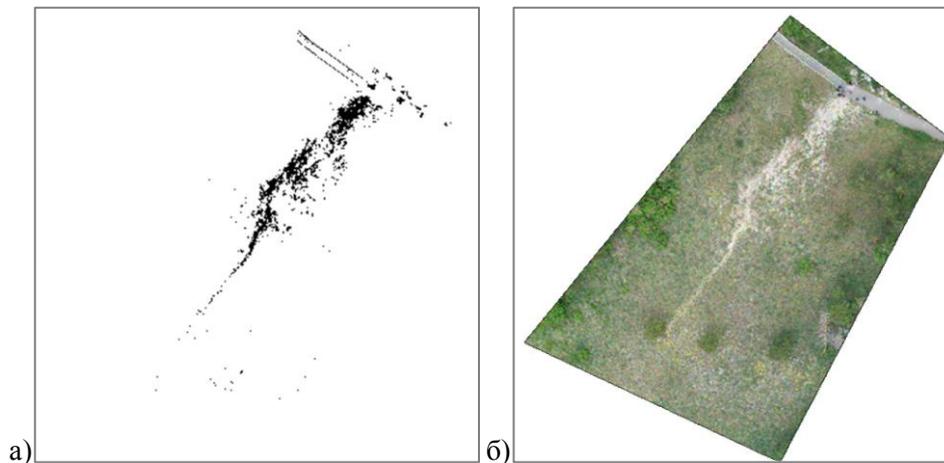


Рисунок 9. Классификация троп: а) результат классификации, б) весенний снимок, полученный с БПЛА.

4. Выводы

Целью проведенных исследований было выяснение, насколько эффективно применение дистанционной съемки с помощью БПЛА для мониторинга рекреационной нагрузки на примере горы Стрельной. Используемый для классификации метод опорных векторов с радиальными базисными функциями показал хорошие результаты при автоматическом выделении вытоптаных мест на земной поверхности. Были найдены все выделенные экспертами по данным наземного мониторинга тропинки, а также несколько мест оголенного склона, что можно считать ложным обнаружением лишь условно, так как алгоритм был настроен именно на поиск вытоптанной (оголенной, лишенной растительности) почвы. Чтобы исключить участки склона, оголенные вследствие естественных природных влияний, от вытоптаных тропинок, необходима постобработка полученных результатов. Мы предполагаем в дальнейшем использовать морфологический анализ для результатов классификации. В целом, можно сказать, что задача выделения тропинок по снимкам БПЛА решена.

Отдельно надо сказать, что еще одна задача – определение состава растительности, как имеющейся, так и вновь появляющейся, осталась пока нерешенной. Это связано как с недостаточностью разрешения даже таких высокодетальных снимков как снимки с БПЛА, так и малочисленностью данных. Планируется в дальнейшем повторять съемку горы Стрельной несколько раз в сезон (весна, осень) хотя бы несколько лет, чтобы иметь статистику наблюдений. По полученной серии снимков можно будет попытаться выделить крупные коалиции растительности с помощью индексов вегетации, которые широко применяются для этих целей при анализе снимков дистанционного зондирования [14, 15].

5. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-07-00748 а, № 17-29-03190 офи_м).

В части подготовки данных посредством съёмки БПЛА исследование поддержано проектом № 19-29-09045 Российского фонда фундаментальных исследований.

6. Литература

- [1] Wight, P. Planning for resource protection and tourism management in protected areas: A practical perspective / P. Wight // *Tourism: People, Places, Products – Waterloo, Canada: Department of Geography, University of Waterloo, 2002. – P.130-141.*

- [2] Государственный доклад о состоянии окружающей среды и природных ресурсов Самарской области за 2014 год, 2015. – Вып. 25. – 298 с.
- [3] Камелин, Р.В. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 855 с.
- [4] Розенберг, Г.С. Красная книга Самарской области. Редкие виды растений, лишайников и грибов / Г.С. Розенберг, С.В. Саксонов – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2007. – Т. 1. – 372 с.
- [5] Об особо охраняемых природных территориях: Федер. закон от 14 марта 1995 г. № 33-ФЗ: ред. от 24 нояб. 2014 г. // Собрание законодательства РФ, 1995. – № 12.
- [6] Shuman, C.S. A comparison of remote sensing and ground-based methods for monitoring wetland restoration success / C.S. Shuman, R.F. Ambrose // *Restor. Ecol.* – 2003. – Vol. 11. – P. 325-333.
- [7] Gillespie, T.W. Measuring and modelling biodiversity from space / T.W. Gillespie, G.M. Foody, D. Rocchini, A.P. Giorgi, S. Saatchi // *Prog Phys Geogr.* – 2008 – Vol. 32. – P. 203-221.
- [8] Wang, K. Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: a review from the perspective of remote sensing specialists / K. Wang, S.E. Franklin, X. Guo, M. Cattet // *Sensors.* – 2010. – Vol. 10. – P. 9647-9667.
- [9] Ostrom, E. Insights on linking forests, trees, and people from the air, on the ground, and in the laboratory / E. Ostrom, H. Nagendra // *Proc. Natural. Acad. Sci. USA.* – 2006 – Vol. 103. – P. 19224-19231.
- [10] Nagendra, H. High resolution satellite imagery for tropical biodiversity studies: the devil is in the detail / H. Nagendra, D. Rocchini // *Biodivers. Conserv.* – 2008. – Vol. 17. – P. 3431-3442.
- [11] Germen, M. Alternative cityscape visualisation: drone shooting as a new dimension in urban photography / M. Germen // *Electronic Visualisation and the Arts (EVA).* – 2016. – P. 150-157.
- [12] Jones, G.P. An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research / G.P. Jones, L.G. Pearlstine, H.F. Percival // *Wild. Soc. Bull.* – 2006. – Vol. 34. – P. 750-758.
- [13] Tay, J.Y.L. Reaching new heights: can drones replace current methods to study plant population dynamics? / J.Y.L. Tay, A. Erfmeier, J.M. Kalwij // *Plant Ecol.* – 2018. – Vol. 219. – P. 1139-1150.
- [14] Ефременко, В.В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем / В.В. Ефременко, Т.Н. Чимитдориев // *Исследование Земли из космоса.* – 1998. – № 3. – С. 49-56.
- [15] Буре, В.М. Выделение однородных зон сельскохозяйственного поля для закладки опытов с помощью беспилотного летательного аппарата / В.М. Буре, Е.П. Митрофанов, О.А. Митрофанова, А.Ф. Петрушин // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.* – 2018. – Т. 14, № 2. – С. 145-150.

Monitoring of the recreation effects on land cover with the use of an unmanned aerial vehicle on the example of the Strelnaya mountain in Samara region

O.A. Belova¹, A.Y. Denisova¹, N.V. Vlasova¹, L.M. Kavelenova¹, E.S. Korchikov¹,
V.A. Fedoseev¹, T.F. Chap²

¹Samara National Research University, Moscovskoye Shosse, 34A, Samara, Russia, 443086

²Zhiguli Nature Reserve, Zhigulyovsk, Russia, 445362

Abstract. The Mount Strelnaya is one of the objects most exposed to recreational stress in the Zhigulevsky State Nature Reserve. Until recently, monitoring studies of the recreational pressure carried out by university staff have been limited to either inspecting plant communities from the metal decking installed on the trace, or descending to the surface of the slope and move along it with the risk of injuring vulnerable vegetation cover. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) opens up new prospects for quick and efficient identification of points affected by recreational exposure, including those remote from the floor, without contacting the slope surface. The first experience of integrating ground-based and UAV-based monitoring was carried out in 2019. The Mount Strelnaya was surveyed in spring and autumn using UAVs. The obtained images were reclassified using the method of reference vectors with radial base functions into "trace" and "non-trace" classes. As a result, it was possible to automatically select trampled slope sections with a high fraction of accuracy. The preliminary results of the work are presented.