

Агрочововедение и агроэкология

УДК 632.523

DOI: 10.31857/S2500262721060090

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО
(*Heracleum sosnowskyi* MANDEN.) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СЪЕМКИ
С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА*****И.Ю. Савин^{1,2}, академик РАН, Д.П. Андронов², аспирант,
Е.А. Шишконокова¹, кандидат географических наук, Ю.И. Вернюк^{1,2}**¹Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский переулок, 7, стр.2²Институт экологии Российского университета дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
E-mail: savin_iyu@esoil.ru.

В последние годы как в России, так и за рубежом значительно увеличились площади, занятые борщевиком Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.), что привело к необходимости разработки надежных методов мониторинга его ареалов. С этой целью была проведена оценка возможностей детектирования борщевика Сосновского по данным съемки территории с использованием беспилотного летательного аппарата. Исследования проведены на примере ключевого участка в Тверской области площадью 70 га, где борщевик Сосновского произрастает небольшими массивами на заброшенных участках, соседствующих с распаханными полями. Съемку проводили 30 июня 2021 г. в фазе цветения борщевика с высоты 100 метров с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 200, оснащенного гиростабилизированной камерой Zenmuse X4S, ведущей съемку в видимом спектральном диапазоне. Полученное цветное изображение было разложено на три канала (R, G и B). После этого последовательно провели несколько классификаций с обучением для выделения соцветий и листьев борщевика. После объединения карт соцветий и карт листьев была получена карта распространения борщевика на территории исследований. Ее точность оценивали на основе построения матрицы ошибок классификации, и она составила более 95 %. Следовательно, растения борщевика Сосновского в фазе цветения могут быть успешно автоматизированно детектированы по изображениям, получаемым с беспилотного летательного аппарата с помощью стандартной фотокамеры. При этом, в отличие от спутниковой съемки, алгоритм детектирования для каждой мозаики изображения, полученного с беспилотного летательного аппарата индивидуален. Это предопределяют специфика съемки, тип наземного покрова территории исследований (особенно тип растительного покрова), а также фенофаза борщевика в момент съемки. Использование разработанного алгоритма на других территориях невозможно без его адаптации. Точность детектирования может быть повышена путем подбора оптимального срока съемки или с использованием мультитременных изображений.

**DETECTION OF SOSNOWSKY'S HOGWEED (*Heracleum sosnowskyi* MANDEN.)
BASED ON UAV SURVEY DATA****Savin I.Yu.^{1,2}, Andronov D.P.², Shishkonakova E.A.¹, Vernyuk Yu.I.^{1,2}**¹V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
119017, Moskva, Pyzhevskii pereulok, 7, str.2²Institute of Environmental Engineering, People's Friendship University of Russia (RUDN University),
117198, Moskva, ul. Miklukho-Maklaya, 6
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

The areas occupied by Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) have significantly increased in recent years both in Russia and abroad, which has led to the necessity of developing reliable methods of monitoring its habitats. The possibilities of detecting Sosnowsky's hogweed by means of territory survey using an unmanned aerial vehicle have been evaluated. The research was carried out on the example of the key 70 ha area in the Tver region where Sosnowsky's hogweed grows in small massifs on the abandoned plots next to plowable fields. The area was photographed on June 30, 2021, in the growth phase of hogweed from the altitude of 100 meters using unmanned aerial vehicle DJI Matrice 200 equipped with Zenmuse X4S gyrostabilized camera shooting in the visible range. The resulting color image was decomposed into three channels (R, G, and B). After that, several training classifications were performed to distinguish inflorescences and leaves of hogweed. After combining the inflorescence and leaf maps, we obtained a map of hogweed distribution in the study area. Its accuracy was estimated on the basis of the classification error matrix, and it was more than 95%. Consequently, plants of Sosnowsky's hogweed can be successfully detected by automated detection of images taken by an unmanned aerial vehicle with a standard camera during the flowering phase of the plants. It appeared that in contrast to satellite imagery, the detection algorithm for each mosaics of the drone images is individual. This is predetermined by the specifics of imaging, the type of ground cover of the study area (especially the type of vegetation cover), as well as the phenophase of hogweed at the time of imaging. It is impossible to use the developed algorithm on other territories without its adaptation. The detection accuracy can be improved by selecting the optimal time of survey or by using multitemporal images.

Ключевые слова: борщевик Сосновского, беспилотный летательный аппарат, мониторинг растительности, классификация изображений

Key words: Sosnowsky's hogweed, unmanned aerial vehicle, vegetation monitoring, image classification

Борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) – эндемик кавказской флоры, который вместе с еще одним кавказским эндемичным борщевиком Мантегацци (*Heracleum mantegazzianum* Somm. et Levier),

распространенным преимущественно в Западной и Центральной Европе, входит в группу «гигантских борщевиков». Растения *H. sosnowskyi* могут достигать 5...6 м в высоту, диаметр главного зонтика – 1,0...1,3 м, диаметр

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-909 от 16 ноября 2020 г.) и в рамках Программы стратегического академического лидерства РУДН.

розетки листьев – 3 м [1]. Вид относится к монокарпикам, размножается семенами, причём одно растение в зависимости от размеров и места произрастания продуцирует, по данным разных авторов, от 5 000 до 100 000 семян [1, 2, 3]. *H. sosnowskyi* нитрофильный, светолюбивый, холодостойкий вид, что позволяет ему успешно произрастать в северных широтах [4].

Борщевик Сосновского отличается быстрым ростом, большой вегетативной массой, способностью давать 2...3 урожая за год, неприхотливостью. В то же время он предпочитает плодородные достаточно влажные нейтральные рыхлые супесчаные, легко- и среднесуглинистые почвы. В неблагоприятных условиях (на тяжелых глинистых, бедных, кислых, неплодородных почвах) растение имеет значительно меньшие размеры [1, 5, 6].

H. sosnowskyi продуцирует большое количество семян. Значительная масса семени (12...14 мг) обуславливает его опадение в основном вблизи материнского растения, в то же время зафиксировано поселение молодых экземпляров вида в радиусе до 5...6 м от него. Распространение семян успешно происходит в зимних условиях – по снегу, по ровной поверхности заледенелых дорог, в последнем случае дальность перемещения зонтиков может составлять сотни метров [4, 7, 8].

Площади, занятые борщевиком Сосновского (*Heraclenum sosnowskyi* Manden.) в последние годы как в России, так и за рубежом сильно увеличились. Скорость распространения вида такова, что, например, в Талдомском районе Московской области его ареалы за 10 лет расширились в 10 раз [9]. Суммарная площадь, занятая *H. sosnowskyi* в Московской области, оценивается в 16,5 тыс. га, в ее северо-западных районах доля таких земель достигает нескольких процентов от общей площади, а на территории отдельных поселений превышает 4 % [10]. В Ленинградской области растения этого вида ежегодно захватывают до 5 % новых территорий [11]. Сходная ситуация складывается на севере Европейской части России, где в радиусе 100 км вокруг Сыктывкара сообщества, с доминированием *H. sosnowskyi*, в начале 2010 гг. занимали около 150 га [12]. Масштабы инвазии этого вида до сих пор трудно оценить, так как он еще полностью не использовал свой потенциал и границы вторичного ареала окончательно не установились [13]. По данным некоторых авторов, к 2015 г. *H. sosnowskyi* уже занимал от 20 до 40 % сельскохозяйственных угодий Северной Евразии [14]. В Польше инвазиями кавказских борщевиков поражены более 50 % лесных районов [15]. В России крупные инвазии борщевика Сосновского ус-тановлены в 54 субъектах Федерации [16]. Для стран Центральной Европы (Германия, Чехия) проблема инвазии гигантских видов рода *Heraclenum* также актуальна, поскольку там активно расселяется *H. mantegazzianum* [17, 18, 19].

Массовое культивирование *H. sosnowskyi* происходило в 60–70 гг., при-чем наиболее масштабно его внедряли в практику с середины 70-х гг. В СССР посе-вы культуры были сосредоточены, в основном, в северо-западных и центральных областях России, в Прибалтике, Белоруссии и на Украине. В качестве экспериментального вида его завезли на Дальний Восток. Выращивали борщевик Сосновского и в странах Восточной Европы – БНР, ВНР, ГДР, ПНР, ЧССР [9, 14, 20].

Важно отметить, что в этот период на полях проводили регулярное скашивание *H. sosnowskyi*, препятствующее образованию генеративных побегов и последующему расселению на прилегающие участки. Однако с 1980-х гг. использование борщевика в сельскохозяйственных целях было прекращено. Причиной

тому стало присутствие в составе растения эфирных масел, снижающих качество кормов, а также фуруку-маринов, влияющих на репродуктивные функции животных и вызывающих дерматиты на коже людей [9].

Сокращение потребности в кормах в период стагна-ции сельскохозяйственной отрасли, пришедшейся на 90-е гг. и сопровождавшейся массовым выведением зем-ель из сельскохозяйственного оборота, привело к рез-кому и неконтролируемому расселению *H. sosnowskyi*, что к началу 2000-х гг. создало серьезную угрозу при-родным ландшафтам [21]. Впервые одичавший эк-земпляр *H. sosnowskyi* был обнаружен в Московской области в 1948 г., а массовый характер этот процесс приобрел в 1970-е гг. [20]. Борщевик начал расселять-ся вблизи от мест его возделывания, на участках, где каким-то образом повреждалась дернина. Сейчас он обычно встречается около заброшенных ферм, на обо-чинах дорог и в кюветах, на пастбищах, пустырях, лугах, в том числе закустаренных, опушках, в поймах рек и ручьев, оврагах и др., поселяясь на сельскохоз-йственных угодьях, землях лесного фонда и в населен-ных пунктах, например, в парках.

Интродукция *H. sosnowskyi* в естественные и полу-естественные сообщества коренным образом влияет на их облик, нарушает сукцессионные связи, препят-ствует возобновлению роста видов исходных сообщ-еств, что позволяет отнести борщевик Сосновского к растениям трансформерам [21,22]. Под его влиянием происходит деградация дернины, что создает предпо-сылки для развития эрозии почв [5]. С конца 2015 г. *H. sosnowskyi* внесен в список сорных растений Рос-сийской Федерации [23] и входит в ТОП-100 наиболее агрессивных чужеродных видов страны [20].

К сдерживающим распространение *H. sosnowskyi* факторам относят плотный стеблестой и войлок рас-тительности, которые затрудняют попадание семян на поверхность почвы, способность к самоизреживанию, а также загрязнение почвы рядом химических веществ [24]. Так, на ряде участков в Чехии по до конца не вы-ясненным причинам наблюдается сокращение популя-ций борщевика [18].

Распространение борщевика Сосновского носит стихийный характер. Это вызывает потребность в по-вышении оперативности и точности мониторинга его ареалов. В последние годы с такой целью все чаще ис-пользуют данные дистанционного зондирования как со спутников [25, 26, 27], так и с беспилотных летатель-ных аппаратов (БПЛА) [28], но надежные алгоритмы их дешифрирования до сих пор не разработаны.

Цель исследования – оценка возможности детек-тирования борщевика Сосновского по данным съем-ки территории с использованием БПЛА, оснащенного стандартной фотокамерой.

Методика. Работу выполняли на тестовом участке, расположенном на землях Всероссийского института мелиорированных земель (филиал ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева») возле поселка Эммаусс в Тверской области (рис. 1).

Площадь тестового участка 70 га. Большую его часть занимают поля ВНИИМЗ, на которых возделыва-ют достаточно большой набор сельскохозяйственных культур (яровые и озимые рожь, ячмень, пшеница, гор-чица, картофель, овес, многолетние травы). На части территории бывшие пахотные земли заброшены более 10 лет. Рельеф участка в основном выположенный сла-боволнистый с перепадом высот не более 10...15 м. В почвенном покрове господствуют осушенные закры-тым дренажем дерново-подзолистые оглеенные почвы,

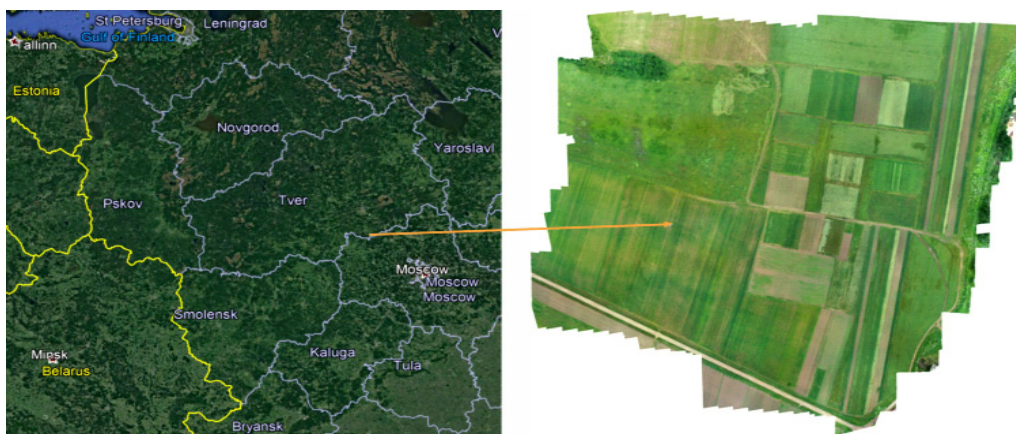


Рис. 1. Территория исследований (справа представлена мозаика изображений, полученных с БПЛА).

развитые на супесях и легких суглинках, подстилаемых в большинстве случаев флювиогляциальными песками, часто с большим количеством валунных и галечниковых включений.

Борщевик Сосновского произрастает небольшими массивами на заброшенных в основном луговых участках, соседствующих с распаханymi полями (рис. 2).

По данным Н.Н. Панасенко [4], в Брянской области борщевик Сосновского начинает развитие весной в конце марта – начале апреля. Это на 7...10 дней опережает начало вегетации других растений, благодаря чему создается значимое конкурентное преимущество. В первую декаду мая заканчивается формирование розетки листьев. Листья *H. sosnowskyi* имеет яркий салатово-зеленый цвет, хорошо выделяющийся на фоне аборигенной растительности [5]. Быстро разрастаясь, борщевик Сосновского формирует густые куртины, которые, затеняя почву, перехватывают до 80 % солнечного света [8]. Это приводит к вытеснению аборигенных видов. В первой декаде июня начинается развитие генеративного побега, к середине этого месяца формируется главный зонтик, а к концу – боковые. Наиболее удачной для дистанционного мониторинга ареалов борщевика Сосновского считается фаза цветения [17]. Рассеивание плодов начинается с середины июля, отмирание листьев – с августа. Отдельные всходы из прошлогодних семян могут появляться в октябре-ноябре.

При проведении исследования использовали БПЛА DJI Matrice 200 с установленной на гиросtabilизируемой подвеске камерой. Квадрокоптер DJI Matrice 200 оснащен мощными двигателями и 43-сантиметровыми



Рис. 2. Борщевик Сосновского на тестовом участке.

пропеллерами, питание осуществляется от двух аккумуляторов с системой обогрева, закрытая конструкция корпуса устойчива к влаге и неблагоприятным метеоусловиям, что позволяет совершать полеты в любую погоду, даже при сильном ветре и отрицательной температуре (от -20 до +45 °С). Полет при стандартных метеоусловиях может осуществляться в рабочем диапазоне 7 км в течение 38 минут с полезной нагрузкой около 2340 г. Максимальная взлетная масса составляет 6140 (https://www.dji.com/ru).

В качестве наземной станции управления использовали пульт с рабочими частотами 2.400...2.483 ГГц и 5.725...5.850 ГГц в паре с планшетником или смартфоном с операционной системой Android. Съемку осуществляли съемной гиросtabilизируемой камерой Zenmuse X4S в видимом спектральном диапазоне (RGB). Основные характеристики камеры: матрица CMOS, 1"; число эффективных пикселей – 20 Мп; объектив F/2.8-11, 8,8 мм (эквивалент формата 35 мм — 24 мм), FOV 84°; форматы фото DNG, JPEG, DNG+JPEG; режимы фотосъемки – одиночный снимок, серийная съемка, интервальная съемка. Для предполетной настройки коптеров и камер использовали приложение DJI GO 4, для автоматизированного построения маршрута полета и осуществления аэрофотосъемки – одновременно приложения для iOS и Android DroneDeploy.

Обработку данных аэрофотосъемки проводили с использованием специального программного обеспечения Agisoft Metashape Professional (https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/metashape_pro) в несколько этапов:

- создание массива снимков, полученных в процессе съемки;

- установление опорных точек для их геометрической трансформации (на этом этапе agisoft metashape оценивает положение и ориентацию камеры, для каждого снимка и устанавливает облако точек, которые используют для трансформации снимков);

- построение полигональной модели;

- создание ортофотоплана на основе облака точек и полигональной модели.

Съемку проводили 30 июня 2021 г. в фазе цветения борщевика с высоты 100 м.

Для детектирования ареалов борщевика полученное цветное изображение было разложено на три канала R, G и B (рис. 3). После этого провели классификацию растительности с обучением (с использованием правила максимального сходства) на два класса: с наличием и без листьев. Далее для пикселей изображе-

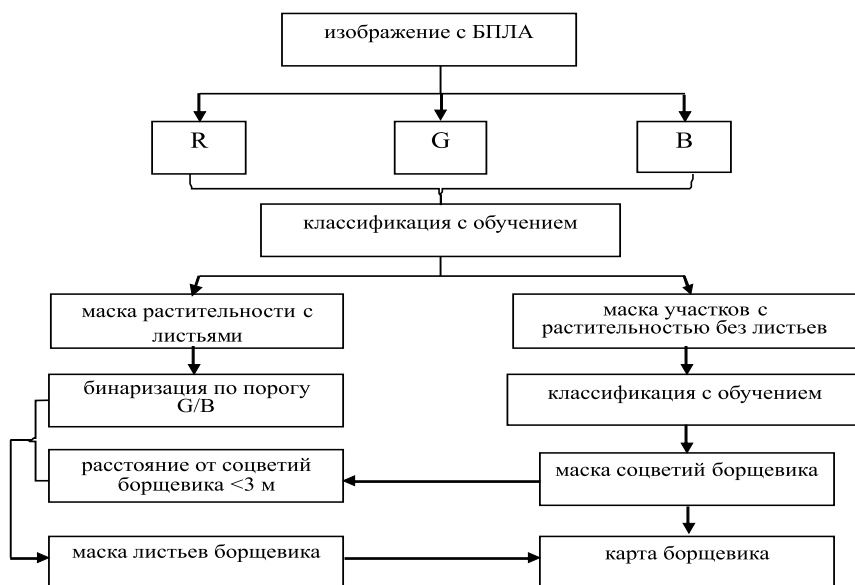


Рис. 3. Последовательность анализа изображений БПЛА.

ния растительности без листьев была проведена еще одна классификация с обучением с выделением класса соцветий борщевика и всех других объектов. Для выделения пикселей с изображением листьев борщевика проводили бинаризацию изображения растительности с использованием экспериментально подобранного порогового значения по изображению, представляющему собой деление изображения в канале G на изображение в канале B. В результате этой операции в один класс попали пиксели с изображением листьев борщевика и часть пикселей с другой, схожей по спектральному облику с ними, растительностью. Для выделения в этом классе пикселей с листьями борщевика было принято правило, что листья борщевика не могут отстоять от стебля растения на расстояние более 3 м. Оно основано на выборочном анализе исходного изображения.

После объединения карт соцветий и карт листьев была получена карта распространения борщевика на территории исследований. Ее точность оценивали путем построения матрицы ошибок классификации. Для этого была создана проверочная выборка пикселей для класса соцветий, класса листьев борщевика и класса других объектов наземного покрова. Ее составил специалист, который не видел построенной карты распространения борщевика.

Пространственное моделирование и анализ изображений проводили с использованием пакета прикладных программ ILWIS 3.3 (<https://www.itc.nl/ilwis/>).

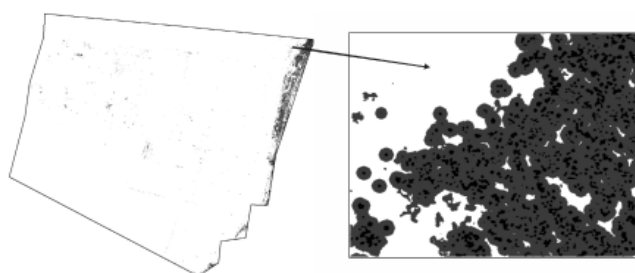


Рис. 4. Распространение борщевика Сосновского на территории исследований, справа показан фрагмент карты в увеличенном виде (серый цвет – листья и стебли борщевика, черный цвет – соцветия).

Матрицу ошибок строили в среде Excel 2020 на основе данных, полученных в ILWIS.

Результаты и обсуждение. Основные ареалы борщевика на обследованной территории приурочены к восточной части тестового участка (рис. 4), которая характеризуется слегка пониженным рельефом и более гидроморфными и неосушенными почвами. Меньшие по площади ареалы приурочены к участкам заброшенной пашни, а также к границам лесных массивов. Отдельные экземпляры встречались у границ пахотных угодий, где размножению растений способствует отсутствие распашки. Необходимо отметить, что самые маленькие растения борщевика, у которых не образовались соцветия, расположенные на удалении от основных ареалов, отдетектировать на основе разработанного подхода было невозможно.

Точность детектирования оказалась вполне удовлетворительной (см. табл.). При детектировании соцветий часть листьев также была определена как соцветия. Это

Матрица ошибок детектирования борщевика Сосновского на территории исследований

		результаты детектирования			сумма	точность производителя	ошибка комиссии
		соцветия	листья	другая растительность			
проверочная выборка	соцветия	479	101	44	624	76,76 %	23,24 %
	листья	28	2080	253	2361	88,10 %	11,90 %
	другая растительность	16	115	1180575	1180706	99,99 %	0,01 %
сумма		523	2296	1180872	1183134	88,28 %	средняя точность производителя
точность пользователя		91,59 %	90,59 %	99,97 %	94,05 %	99,95 %	общая точность
ошибка комиссии		8,41 %	9,41 %	0,03 %			редняя точность пользователя

связано с тем, что практически все соцветия изображаются на фоне листьев. Небольшая часть другой растительности была детектирована как соцветия из-за близости их спектрального облика. Листья борщевика детектированы достаточно надежно (с ошибкой около 10 %). Неточности связаны в основном с пропуском листьев у растений в более ранней, чем у остальных, фазе развития, у которых на момент съемки не было соцветий, а также с погрешностями в детектировании самих соцветий.

В целом, точность определения борщевика в наших исследованиях, оказалась выше, чем у карт, полученных другими способами. Так, по данным Чабан Л.Н. и Митрофанова Е.М. [28] погрешность автоматизированного выделения борщевика на основании результатов съемки с БПЛА на разных участках в Московской области варьировала от 10 до 40 %. Во многих работах точность детектирования вообще не оценивали [29, 30, 31].

Следует отметить, создать полностью автоматизированный алгоритм для детектирования борщевика на территории исследований оказалось невозможным, что достаточно логично. Изображение растительности на данных дистанционного зондирования (спутниковых или получаемых с помощью БПЛА) очень изменчиво во времени [32]. Это априори ведет к изменению оптимальных пороговых значений [33]. В результате использованные в нашем исследовании пороговые значения не будут такими же для снимков, сделанных в другие сроки. Кроме того, характер изображения растительности на снимках, получаемых с БПЛА, определяется условиями съемки (например, высотой) [34]. Также известно, что успешности детектирования какого-либо типа растительности зависит от типа соседних ареалов растительности на территории исследований (от контрастности их изображения по отношению к изображению детектируемой растительности) [35]. Все эти достаточно очевидные факты были подтверждены в ходе нашего эксперимента.

При этом, в отличие от спутниковых снимков, на основе которых часто получают данные в виде относительной площади ареалов борщевика на территории регионов или участков (<https://sovzond.ru/projects/6019/>), мозаики изображений с БПЛА дают информацию практически на уровне отдельных растений.

Недостатки подхода, примененного в исследовании, вполне могут быть устранены путем использования мультитименных изображений, получаемых с БПЛА. Это дает возможность проводить анализ в разные фазы вегетации растений, что повышает вероятность их корректного автоматизированного детектирования. Так, в нашем случае, отдельные растения борщевика, находящиеся на более поздней фазе развития, детектировались надежнее, чем задерживающиеся в развитии. Об этом свидетельствует анализ состояния растений, которые были пропущены при детектировании. Более 90 % из них ко времени съемки еще не сформировали соцветий. При проведении повторного обследования территории в более поздние сроки их также можно было бы определить на основе разработанного подхода.

Многие авторы, использующие спутниковые данные, считают наиболее продуктивными подходы, основанные на интерпретации данных, полученных при съемке как в видимом, так и в ИК диапазонах [9, 30, 36]. Судя по результатам оценки точности наших исследований (см. табл.), использование стандартной камеры видимого диапазона съемки без привлечения данных ИК диапазона оказалось вполне успешным, что значительно упрощает и удешевляет процесс получения необходимых для анализа изображений.

Таким образом, растения борщевика Сосновского могут быть успешно автоматизированно детектированы по изображениям, получаемым с БПЛА с использованием стандартной фотокамеры в фазе цветения растений. В отличие от спутниковой съемки, алгоритм детектирования для каждой мозаики БПЛА индивидуален. Это предопределяется спецификой съемки, типом наземного покрова территории исследований (особенно типом растительного покрова), а также фенофазой борщевика в момент съемки. Несмотря на подобные ограничения, БПЛА позволяют получать информацию о распространении борщевика на уровне отдельных растений без применения специальных видов съемки, чего с использованием спутниковых данных, судя по имеющимся сведениям в научной литературе, добиться невозможно. Точность и надежность детектирования в перспективе могут быть повышены путем привлечения для анализа данных БПЛА, полученных в разные фазы развития растений на территории исследований.

Литература.

1. Каченко К.Г., Краснов А.А. Борщевик Сосновского: экологическая проблема или сельскохозяйственная культура будущего? (Обзор) // *Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН*. 2018. Вып. 20. С. 1–22.
2. Антипина Г.С., Шуйская Е.А. Семенная продуктивность инвазионного вида борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskii* Manden.) в южной Карелии // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2009. № 3(99). с. 23–25.
3. Прохоров В.Н., Мишина М.Ю., Ламан Н.А., Росоленко С.И., Тимофеева И.В. Способ определения жизнеспособности семян борщевика Сосновского. Патент на изобретение ВУ 20369 С1 2016.08.30.
4. Панасенко Н.Н. Некоторые вопросы биологии и экологии борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskii* Manden.) // *Российский журнал биологических инвазий*. 2017. Т.10. №2. С. 95–106.
5. Широкова В.А., Озерова Н.А. Инвазия эндемика кавказа борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskii*) в экосистемы пойм рек европейской равнины // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2016. № 4 (4). С. 66–78.
6. Mežaka A., Zvaigzne A., Tripāne E. *Heracleum sosnowskii* Manden. Monitoring in protected areas – a case study in Rēzekne municipality, Latvia // *Acta Biol. Univ. Daugavp.* 2016. Vol. 16 (2). P. 181–189.
7. Кривошеина М.Г., Озерова Н.А., Петросян В.Г. Распространение семян борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskii* Manden.) в зимний период // *Российский журнал биологических инвазий*. 2020. Т.13. № 3. С. 22–31.
8. Nielsen C., Ravn H.P., Nentwig W. and Wade M. (eds.). *The Giant Hog-weed Best Practice Manual. Guidelines for the management and control of an invasive weed in Europe*. Hoersholm, Denmark: Forest & Landscape, 2005. 44 p.
9. Богданов В.Л., Николаев Р.В., Шмелева И.В. Инвазия экологически опасного растения борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskii* Manden.) на территории европейской части России // *Региональная экология*. 2011. № 1–2 (31), С. 43–52.
10. Далькз И.В., Захожий И.Г., Чадин И.Ф. Распространение борщевика Сосновского и мероприятия по его ликвидации на территории МО ГО «Сыктывкар» (республика Коми) // *Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН*. 2018. № 3 (205). С. 2–13.
11. Богданов В.Л., Осипов А.Г., Гарманов В.В. *Методика*

- мониторинга засорения земель борщевиком Сосновского по данным дистанционного зондирования // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020. № 59. С. 69–74.
12. Головки Т.К., Далькэ И.В., Чадин И.Ф. Инвазивный потенциал *Heracleum sosnowskyi Manden.* и контроль за распространением борщевика гигантского в агроклиматической зоне республики Коми (проект ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН, 2012 г.) // *ИБ Коми НЦ УрО РАН*. 2013. №4. С. 18–19.
 13. Эколого-географический анализ распространения и встречаемости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi Manden.*) в связи со степенью аридности территорий и его картирование для европейской территории России / А. Н. Афонин, Н. Н. Лунева, Ю. С. Ли и др. // *Экология*. 2017. № 1. С. 66–69.
 14. Ткаченко К.Г., Краснов А.А. Борщевик Сосновского: экологическая проблема или сельскохозяйственная культура будущего? (Обзор) // *Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН*, 2018. Вып. 20. С. 1–22.
 15. Rzymiski P., Klimaszuk P., Poniedzialek B. Invasive giant hogweeds in Poland: Risk of burns among forestry workers and plant distribution // *Burns*. 2015. Vol. 41. (8), P. 1816–1822.
 16. Чадин И.Ф., Далькэ И.В., Мальшев Р.В. Оценка морозостойкости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi Manden.*) после удаления снежного покрова в ранневесенний период // *Российский Журнал Биологических Инвазий* 2018. № 4, С. 105–116.
 17. Müllerova J., Pergl J., Pysek P. Remote sensing as a tool for monitoring plant invasions: Testing the effects of data resolution and image classification approach on the detection of a model plant species *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed) // *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. Vol. 25., P. 55–65.
 18. Empirical and virtual investigation of the population dynamics of an alien plant under the constraints of local carrying capacity: *Heracleum mantegazzianum* in Czech Republic / N. Nehrbass, E. Winkler, J. Pergl, et al. // *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 2006. Vol.7.(4). P. 253–262.
 19. Thiele J., Otte A. Invasion patterns of *Heracleum mantegazzianum* in Germany on the regional and landscape scales // *Journal for Nature Conservation*. 2008. Vol.16. (2). P. 61–71.
 20. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / ред. Ю.Ю. Дзедубадзе, В.Г. Петросян, Л.А. Хляп. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2018, 688 с.
 21. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России (Чужеродные виды растений в экосистемах Средней России). М. ГЕОС, 2009. 494.
 22. Распространение инвазионных видов растений на территории Брянской области: *Heracleum sosnowskyi* / Н.Н. Панасенко, А.В. Харин, И.М. Ивенкова и др. // *Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований*. 2014. № 1 (5). С. 48–50.
 23. О статусе вида борщевик Сосновского *Heracleum sosnowskyi Manden.* на территории РФ / Н.Н. Лунева, Г.Ю. Конечная, Т.Н. Смекалова и др. // *Вестник защиты растений*. 2018. № 3(97). с. 10–15
 24. Кондратьев М.Н., Бударин С.Н., Ларинова Ю.С. Физиолого-экологические механизмы инвазивного проникновения борщевика сосновского (*Heracleum sosnowskyi Manden.*) в неиспользуемые агроэкосистемы // *Известия ТСХА*. 2015. № 2. С. 36–49.
 25. Рыжиков Д. М., Тимофеев А. С. Технология мониторинга борщевика Сосновского с онлайн геопортальной поддержкой // *Дистанционное зондирование Земли — сегодня и завтра: материалы 2-й Международной конф.* 2014. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4639> (дата обращения: 17.08.2021)
 26. Рыжиков Д.М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 92 (6). С. 43–51.
 27. Идентификация зарослей борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования Земли / В.В. Рутман, Г.Я. Кантор, Т.А. Адамович и др. // *Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Киров: Вятский государственный университет; Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2018. С. 81–85.
 28. Чабан Л.Н., Митрофанов Е.М. Перспективы автоматизации выделения борщевика Сосновского по снимкам с БПЛА средствами ГИС // *Приложение к журналу Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции*. 2019. № 10-1. С. 122–127.
 29. Жиглова О. В. Использование геоинформационных технологий при выявлении очагов борщевика Сосновского // *Защита и карантин растений*. 2012. № 5. С. 8–9.
 30. Григорьев А.Н., Рыжиков Д.М. Общая методика и результаты спектрорадиометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 1. С. 183–192.
 31. Рутман В.В., Кантор Г.Я. Разработка компьютерной программы для идентификации борщевика Сосновского по аэрофотоснимку // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Киров: Изд-во «Радуга-пресс». 2016. С. 183–185.
 32. Seasonal Variation in the NDVI-Species Richness Relationship in a Prairie Grassland Experiment (Cedar Creek) / R. Wang, J.A. Gamon, R.A. Mont-gomery, et al. // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No. 2. P. 128.
 33. Estimating the Threshold of Detection on Tree Crown Defoliation Using Vegetation Indices from UAS Multispectral Imagery / K. Otsu, M. Pla, A Duane, et al. // *Drones*. 2019. Vol. 3. No. 4. P. 80
 34. Mapping of rill erosion of arable soils based on unmanned aerial vehicles survey / A.N. Kashtanov, Y.I. Vernyuk, I.Y. Savin, et al. // *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. № 4. P. 479–484.
 35. Yichun Xie, Zongyao Sha, Mei Yu. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review // *Journal of Plant Ecology*. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 9–23.
 36. Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. №3. С. 34–40.

Поступила в редакцию 31.08.2021
 После доработки 20.09.2021
 Принята к публикации 07.10.2021