

УДК 910.2:528.8

А.А. Сучилин¹, О. В. Вахнина²

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНОГО СПЕКТРОМЕТРИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ САТИНСКОГО ПОЛИГОНА)

Рассмотрены основные направления научных исследований последних лет, проводимых на полигоне «Сатино» сотрудниками кафедры картографии и геоинформатики в содружестве со специалистами других кафедр. Наибольшее внимание уделено исследованиям, связанным с разработкой методики стереосъемки рельефа местности с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и наземному спектрометрированию растительности.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, дифференциальные геодезические станции, мобильные комплексы глобальных навигационных спутниковых систем, цифровая модель рельефа, нормализованный разностный вегетационный индекс, полевые географические исследования, долинные луга

Введение. Научная работа кафедры картографии и геоинформатики на учебно-научном полигоне «Сатино» с момента его основания в 1968 г. связана с разработкой картографических, дистанционных и геоинформационных методов исследования географических объектов и процессов и охватывает полный цикл исследований с этапа сбора исходных данных в полевой период до создания и использования картографических материалов в геоинформационных системах (ГИС «Сатино»). Одним из основных направлений на протяжении многих лет является развитие полевых методов исследования на основе новых видов оборудования [Suchilin, 2015] и материалов наземного, воздушного [Gallagher, Lawtence, 2016] и космического звеньев дистанционного зондирования. В рамках этого направления в последние годы ведутся разработки методики съемки с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для анализа и оценки территории [Курков с соавт., 2014], проводятся исследования с использованием наземного спектрометрирования для изучения взаимосвязей спектральных характеристик с продукцией и другими показателями долинных лугов.

Основная цель работы – разработка методик дистанционных исследований, проводящихся в приземном слое и с небольших высот, оценка возможности использования полученных данных для решения картографо-географических задач, а также для выявления связи между свойствами исследуемых объектов и характеристиками, получаемыми по другим материалам дистанционного зондирования с меньшей детальностью и оперативностью.

Материалы и методы исследований. В научных работах на Сатинском полигоне независимо от их направленности в качестве базовых используются материалы геодезического, картографического и

аэрокосмического обеспечения, созданного усилиями сотрудников кафедры картографии и геоинформатики в предшествующие годы. Это составленные и периодически обновляемые (последняя редакция 2014 г.) учебные топографические карты масштаба 1:5000 и 1:10 000, массив разномасштабных (от 1:2000 до 1:40 000) панхроматических и спектрально-аэрозонных снимков, а также многозональных космических снимков высокого разрешения (от 0,5 до 2,4 м), полученных на разные даты в результате специально заказанных съемок полигона.

Поиск и хранение материалов дистанционного зондирования, переведенных в цифровой формат, осуществляется в созданной на кафедре справочной информационной системе: «Материалы ДЗ на территорию Сатинского учебного полигона» [Сучилин с соавт., 2013]. Она позволяет просматривать и получать копии материалов космической и аэрофотосъемки, перспективной съемки с вертолета, воздушного шара и дельтаплана, а также современные и исторические картографические произведения на территорию полигона: чертежи и межевые планы, карты из атласов Российской империи (рис. 1). Материалы справочной системы использовались для анализа изменений на участке зондирования с помощью БЛА и для выбора положения учетных площадок спектрометрирования.

Для воздушной съемки применен общедоступный БЛА любительского класса DJI Phantom-3 (компания DJI Innovations, Китай) без специальной аппаратуры для фотограмметрической съемки, оснащенный камерой DJI (размер снимка 4000×3000 pix, фокусное расстояние 4 мм, диафрагма f/28 с, выдержка 1/640). Технические возможности БЛА обеспечивают радиус действия 1500 м от точки взлета и высоту полета до 500 м.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, ст. науч. с.; e-mail: asuhov@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра картографии и геоинформатики, науч. с.; e-mail: vachnina-ov@yandex.ru

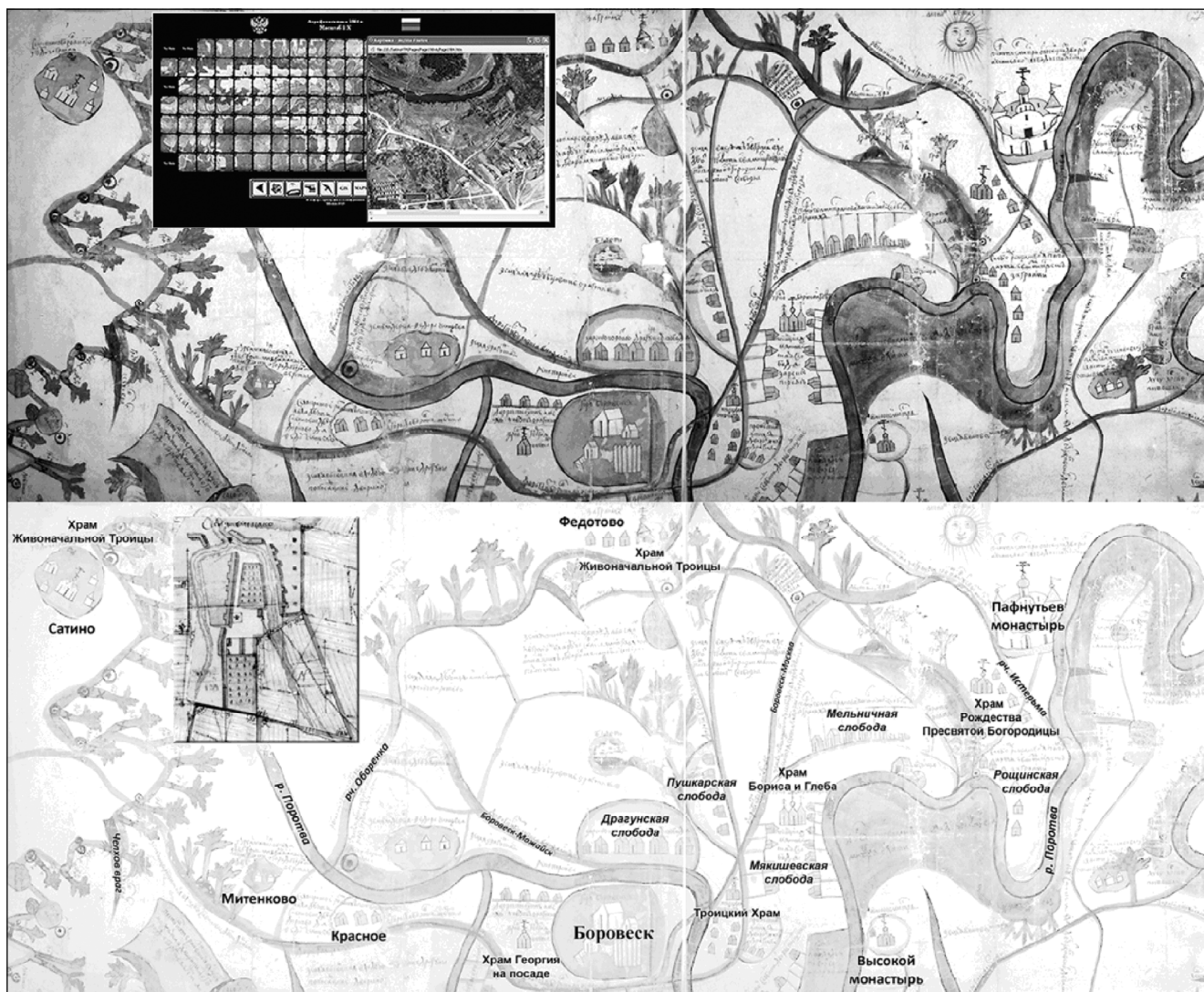


Рис. 1. «Чертеж Боровского Пафнутаева монастыря, селениям и пустошам монастырским». На врезках: Интерфейс поиска цифровых материалов, межевой план с. Сатино XV–XVI вв.

Fig. 1. «Borovsko-Pafnut'yevsky Monastery chart with hamlets and wealds». Insets: Digital material search interface; demarcation plan of the Satino village 15–16th cc.

Наземное спектрометрирование выполнено полевым спектрометром SpectroSense2 (компания Skye Instruments, Великобритания), регистрирующим падающее (в пределах полусферы над сенсором) и отраженное от поверхности объекта (внутри конуса в 25°) излучение в красной (650 нм) и ближней инфракрасной (800 нм) зонах спектра на высоте до 2 м от поверхности земли.

Результаты исследований и их обсуждение. БЛА находят все большее применение в дистанционном зондировании [Mancini et al., 2013], полученные материалы предназначены для создания карт и цифровых моделей местности, оперативного мониторинга природных процессов, что особенно важно для таких труднодоступных объектов, как ледники, болота и т. п. В настоящее время кафедра картографии и геоинформатики совместно с кафедрой геоморфологии и палеогеографии провела на полигоне «Сатино» исследование оползневых и эрозионных

форм рельефа правого борта долины р. Протва в районе села Беницы, где в июне 2017 г. произошло оползание участка площадью 327,3 м². Для фиксации пространственных изменений рельефа на тестовом участке была апробирована методика воздушного зондирования с БЛА в сочетании с применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в целях оперативного составления плана и геоморфологической схемы оползня [Воскресенский с соавт., 2017].

В процессе воздушной фотосъемки с БЛА получена серия из 28 перекрывающихся цифровых снимков, на которых детально отобразились особенности рельефа и однозначно опознавались опорные точки, размещенные на участке съемки в виде «конверта». Центральная точка снимков фиксировалась штатной навигационной системой GPS в режиме кинематика, координаты которой присутствуют в файле каждого снимка. Продольное перекрытие

снимков составило 80%, поперечное – более 60%, высота залета 50 м. Опорные точки однозначно зафиксированы мобильными ГНСС комплексами и уравниены относительно сети ДГС ГНСС («Satio» и «МО_MSU»³), что позволило получить их координаты сантиметровой точности.

Из материалов цифровой съемки отобраны снимки с равномерной освещенностью, после чего они подверглись фотограмметрической обработке. Рассчитаны связующие точки для стереопар снимков и сформировано «плотное облако» точек, покрывающее изучаемую территорию. После предварительной обработки цифровые снимки трансформированы в принятую систему координат полигона (Калуга-40), что позволило интегрировать их в геоинформационную часть проекта отдельными слоями и провести необходимое моделирование. Модель,

составленная по материалам дистанционной крупномасштабной съемки БЛА с применением ГНСС, позволила оперативно составить цифровую модель рельефа (ЦМР) тестового участка, построить горизонтали с заданной высотой сечения рельефа (рис. 2), провести дополнительные операции пространственного анализа (вычленение и обобщение, расчет объемов, углов наклона, экспозиции склонов, профилирование и т. п.).

Применение полученных материалов съемки в сочетании с геолого-геоморфологическими характеристиками [Строение и развитие ..., 1996], включая натурные исследования, позволило составить геоморфологическую схему участка (рис. 3), провести комплексный анализ условий рельефообразования и проявления оползневых процессов, представляющих потенциальную опасность.

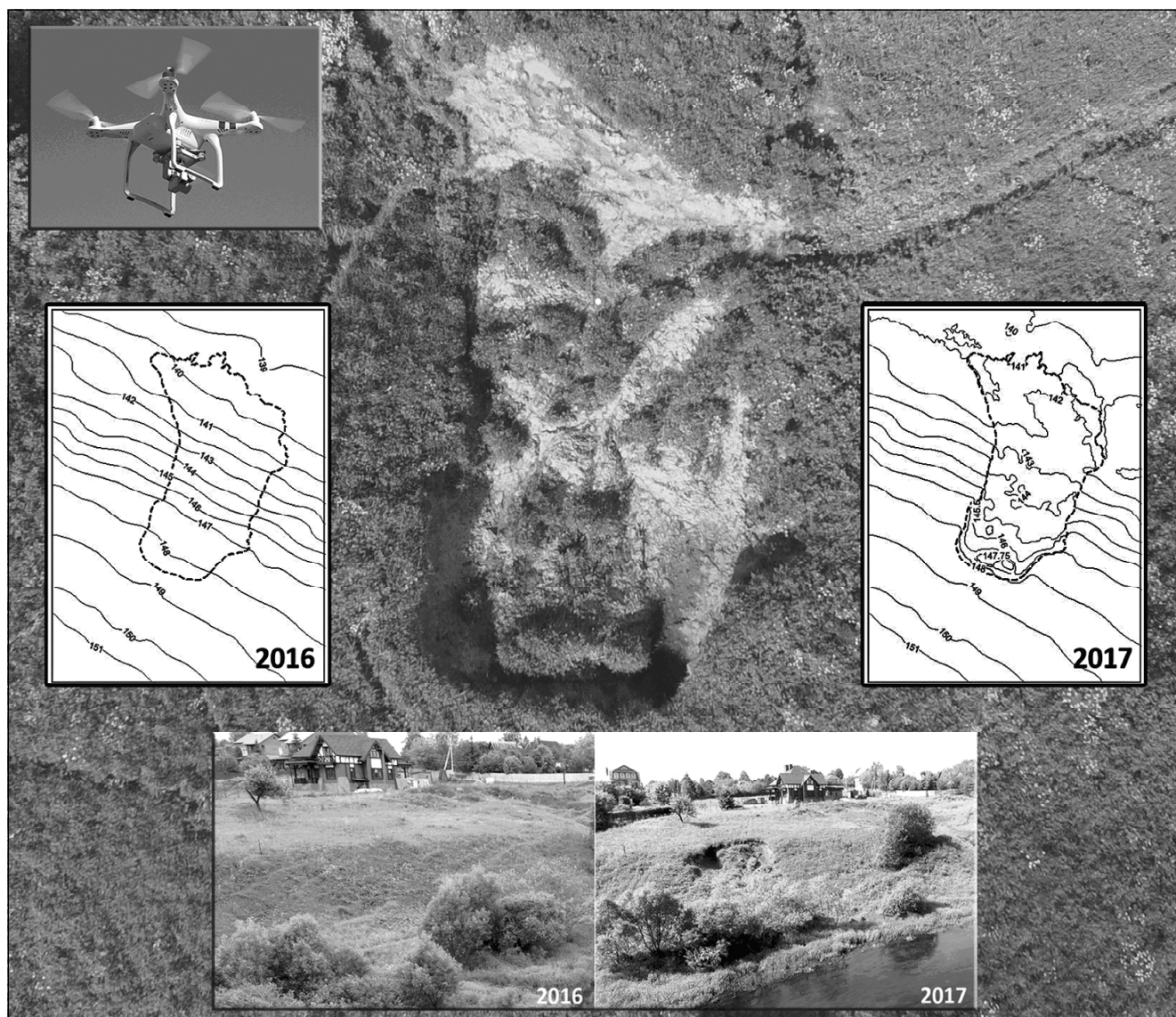


Рис. 2. Исходный снимок с БЛА, рельеф и разновременные перспективные снимки участка исследований (2016–2017 гг.)

Fig. 2. The original photo taken by the UAV, relief and multi-temporal perspective photos of the area under study (2016–2017)

³ «МО_MSU» – совместный проект географического ф-та МГУ и компании «Фирма G.F.K.».

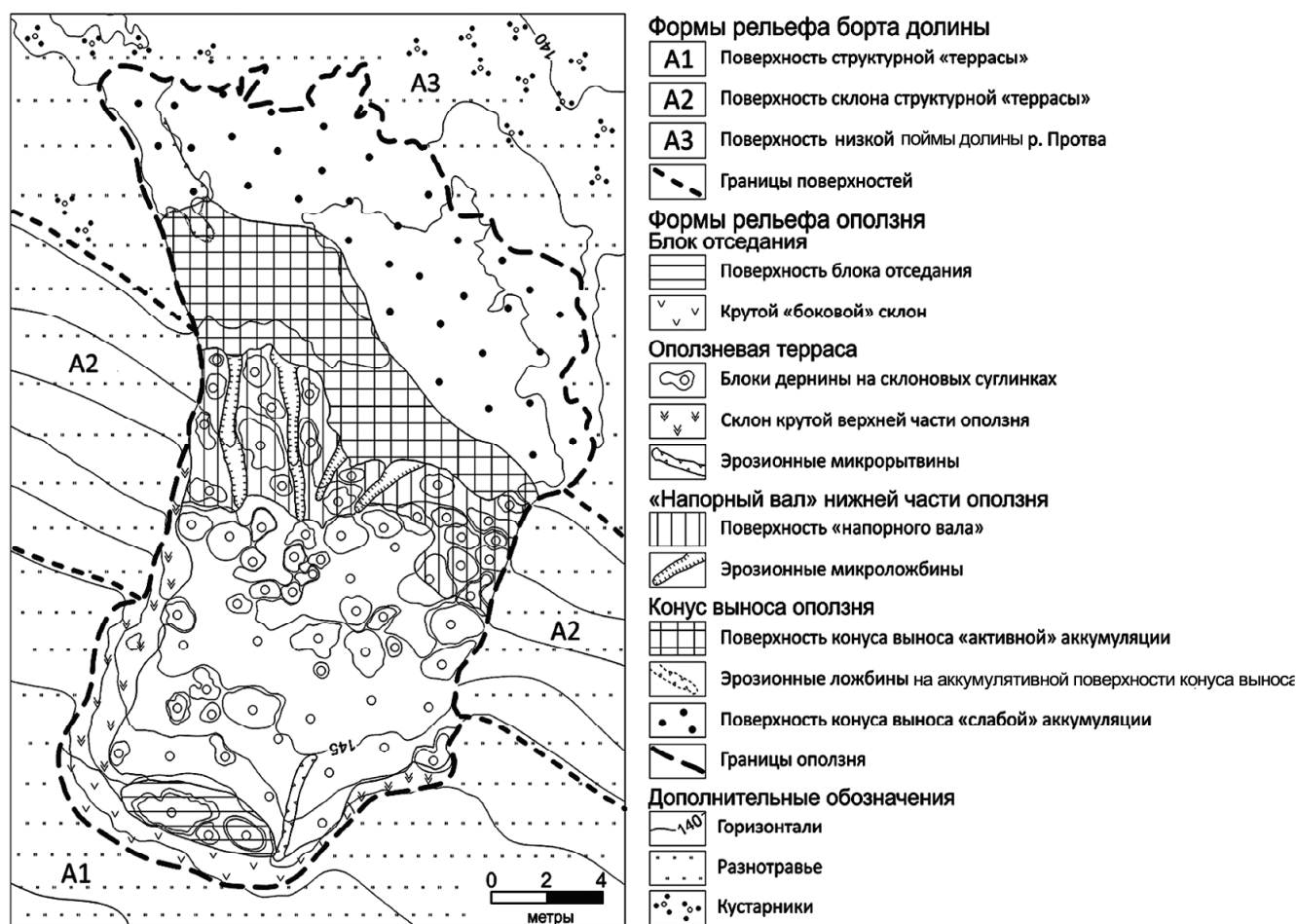


Рис. 3. Геоморфологическая схема исследуемого участка (составлена И.С. Воскресенским)

Fig. 3. Geomorphologic scheme of the studied area (compiled by Voskresensky I.S.)

В целом, использование общедоступных БЛА для оперативной аэросъемки локальных территорий, а также для получения материалов заданной картографической точности, доказало свою эффективность. Совокупность применения БЛА и ГНСС позволяет оперативно выявлять новые образования рельефа, дистанционно получать их детальные количественные характеристики, и на основании этих данных проводить натурные исследования и их мониторинг. Точность высот ЦМР, исходя из соотношения «высота-базис» при высоте съемки 50 м, составила 10–12 см. Среднеквадратическая погрешность при уравнивании и измерении на опорных точках, подтверждает данную точность. Полученные значения удовлетворяют требованиям, предъявляемым к инженерно-топографическим планам масштаба 1:500 с сечением рельефа 0,5 м. Разрешение одного пиксела на местности составило 3–4 см. Разработанная методика съемки с БЛА совместно с ГНСС найдет свое применение в учебно-научном процессе, в частности, позволит оперативно фиксировать и отображать на картах изменения в границах полигона, а также может быть использована и в других географических исследованиях.

Обеспеченность полигона многозональными космическими снимками высокого разрешения стимулировала развитие еще одного направления исследований – наземного спектрометрирования, необходимого для установления связи параметров объектов с их спектральными дешифровочными признаками на снимках [Зимин с соавт., 2014; Sahoo, 2015]. В рамках этого направления с 2008 года совместно с сотрудниками кафедры биогеографии [Огуреева с соавт., 2009; Микляева, Вахнина, 2016], проводится наземное спектрометрирование долинных лугов полигона. В качестве спектрального признака использовался нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), применяющийся для выделения по многозональным снимкам зеленой растительности и служащий косвенным показателем количества фитомассы и содержания хлорофилла в листьях. В ходе работ исследовалась взаимосвязь значений NDVI с величиной фитомассы, влияние на характер этой взаимосвязи других параметров лугов, их сезонной и многолетней динамики. Так как выполнялось спектрометрирование живых растений, анализировалась фитомасса в сыром состоянии.

Связь фитомассы с различными видами вегетационных индексов, в том числе с NDVI, исследу-

ется по большей части при оценке продукции сельскохозяйственных культур [Середа, Тутубалина, 2017; Сторчак, Ерошенко, 2014]. Примеров подобных работ по оценке продукции естественных лугов значительно меньше. В отличие от представленной работы, проводятся исследования, относящиеся к другим типам растительности [Ботвич с соавт. 2017; Муратова, Бекмухамедов, 2013]. В них не рассматривается многолетняя динамика фитомассы, а сезонная и многолетняя динамика NDVI анализируется в основном по материалам космической съемки [Рулев с соавт., 2016; Терехин, 2015].

В ходе работ на полигоне разработана методика спектрометрирования с учетом влияния условий наблюдения, проведено более 900 сеансов спектрометрирования на девяти постоянных и более чем на 50 временных учетных площадках размером 0,25 м², получены количественные характеристики лугов, включая распределение сырой фитомассы по фитоценотическим горизонтам с имеющимися соцветиями и без них.

Установлено, что характер связи величины сырой фитомассы и значений NDVI в значительной степени зависит от типа лугов и морфологии доминантов (формы и положения в пространстве листовых пластинок), а взаимосвязь в пределах одного типа лугов не является линейной (рис. 4). На учетных площадках с величиной сырой фитомассы более определенной величины, различной у разных типов лугов (в среднем 400–500 г/0,25 м² или 1,6–2,0 кг/м²), дальнейшее увеличение фитомассы не приводит к заметному увеличению NDVI. Такой результат объясняется снижением влияния фрагментов почвы и подстилки на формирование отраженной радиации по мере увеличения фитомассы. Проанализировано влияние обилия соцветий на значения NDVI. Выявлено, что увеличение веса соцветий на 1% от общей фитомассы приводит к уменьшению NDVI в среднем также на 1%. Это необходи-

мо учитывать при оценке взаимосвязи NDVI с величиной фитомассы.

Сезонная динамика изучалась по результатам обследования постоянных учетных площадок с интервалом около 10 дней с конца мая – начала периода формирования фитомассы, до последней декады июля – ее максимального накопления, а также однократно в конце сентября в фазу затухания вегетации. Выявлено несколько типов сезонных кривых NDVI, характерных для лугов, различающихся продолжительностью периода вегетации, особенностями морфологии растений, темпами накопления и сроками достижения максимальной величины фитомассы. Большое влияние на характер кривых оказывает обилие соцветий. От него зависит степень инверсии NDVI, которая в наших исследованиях достигала в период цветения доминантов 11–12%. На рис. 5 представлены два наиболее различающихся типа кривых, выявленных у лугов с минимальным и максимальным весом соцветий. Особенности сезонных кривых NDVI позволяют сделать вывод о возможности использования их для исследования сезонной динамики лугов разных типов на основе материалов дистанционного зондирования.

Исследование многолетней динамики фитомассы и NDVI выполнено по результатам, полученным в середине июля при максимальной величине фитомассы. Оно показало, что наиболее продуктивные луга отличаются наибольшими колебаниями величины фитомассы при наименьшей изменчивости значений NDVI, менее продуктивные – характеризуются большим разбросом значений NDVI при меньшей изменчивости величины фитомассы. Полученные данные подтверждают выводы о нелинейной зависимости NDVI от величины фитомассы и позволяют говорить о целесообразности использования данных многолетней изменчивости NDVI для изучения менее продуктивных лугов (в нашем исследовании с фитомассой менее 1,6–2,0 кг/м²).

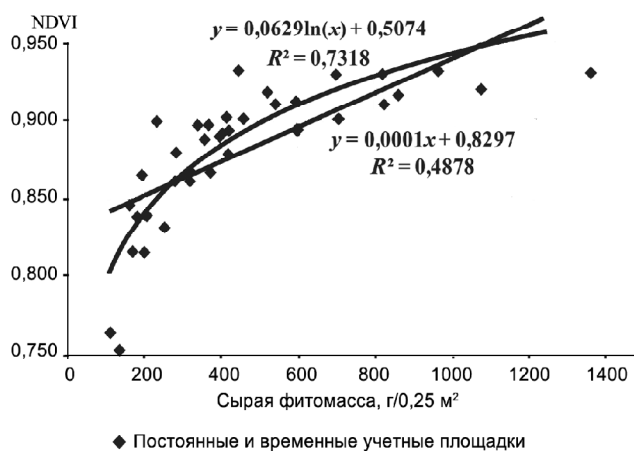


Рис. 4. Зависимость NDVI от величины сырой фитомассы (без соцветий)

Fig. 4. Dependence of NDVI on the value of crude phytomass (without flower heads)

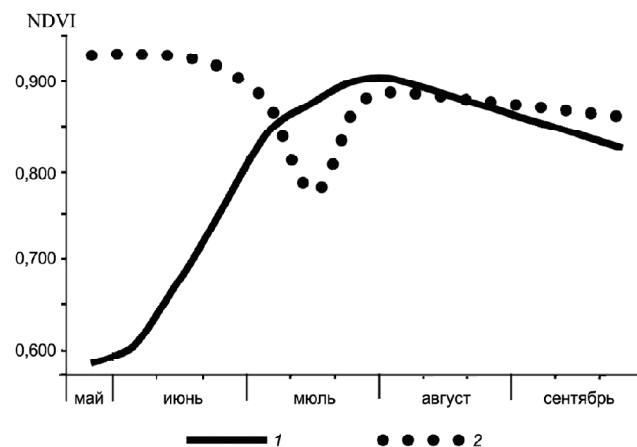


Рис. 5. Пример сезонных кривых NDVI: 1 – участок луга с минимальным количеством соцветий; 2 – участок луга с обильно цветущими растениями

Fig. 5. Example of NDVI seasonal curves: 1 – meadow plot with a minimum number of flower heads; 2 – meadow plot with abundant flowering plants

Выводы:

– использование в географических исследованиях БЛА в сочетании с ГНСС, представляется весьма перспективной методикой для оценки и оперативного крупномасштабного мониторинга исследуемой территории, особенно – труднодоступных участков земной поверхности;

– разработанная при проведении исследований полигона методика, предусматривающая использование БЛА и ГНСС с опорой на точки планово-высотного обоснования и последующую фотограмметрическую обработку полученных цифровых снимков, позволила создать ортофотоплан, ЦМР, и крупномасштабный план исследуемой территории с точностью, соответствующей масштабу исследований. Использование ортофотоплана и ЦМР, полученных на территорию с выраженными рельефообразующими процессами позволило провести пространственный анализ территории, составить геоморфологическую схему и использовать их в дальнейшем для оперативного мониторинга изучаемой местности.

Преимуществом съемки является возможность заранее планировать схему полета БЛА в автоматическом режиме и задавать параметры съемки, используя координаты одной точки на участке зондирования. К выявленным недостаткам можно отнести два фактора: ограниченное время полета БЛА

влияет на площадь охвата съемки; наличие растительности усложняет процесс обработки материалов зондирования, делая более предпочтительным проведение съемки свободных от растительности участков;

– разработанная совместно с сотрудниками кафедры биогеографии методика комплексного обследования долинных лугов в сочетании с наземным спектрометрированием позволила оценить возможность использования нормализованного разностного вегетационного индекса для исследования и оценки фитомассы луговой растительности. Анализ взаимосвязи сырой и абсолютно сухой фитомассы показал необходимость проведения в этом направлении дополнительных изысканий. Установлен нелинейный характер зависимости величины NDVI от размера фитомассы. Показана целесообразность применения NDVI для оценки фитомассы менее продуктивных лугов (в нашем исследовании с сырой фитомассой менее 1,6–2,0 кг/м²) и внесения повышающих поправок в значения NDVI в период цветения. Выявлена возможность применения сезонных кривых NDVI для выделения некоторых типов лугов по материалам дистанционного зондирования. Установлено, что многолетняя изменчивость сезонных кривых NDVI может быть использована для исследования «устойчивости» менее продуктивных лугов к изменению условий произрастания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ботвич И.Ю., Волкова А.И., Кононова Н.А., Иванова Ю.Д., Шевырногов А.П. Спектрометрирование травянистой растительности Красноярского края и Республики Хакасия: методика измерений, хранение и обработка данных // Решетневские чтения. 2017. № 21-1. С. 398–400.

Воскресенский И.С., Ушакова Л.А., Сучилин А.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л. ГНСС и воздушное зондирование для мониторинга опасных природных процессов при эксплуатации газотранспортной системы // Мат-лы XIII общероссийской конф. изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2017. Т. 1. С. 35–36.

Зимин М.В., Тутубалина О.В., Голубева Е.И., Рис Г.У. Методика наземного спектрометрирования растений Арктики для дешифрирования космических снимков // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 4. С. 34–41.

Курков В.М., Смирнов А.В., Иноземцев Д.П. Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на Заокском геополитоне. М.: МИИГАИК, Геопроби, 2014. № 4. С. 55.

Микляева И.М., Вахнина О.В. Фитомасса долинных лугов. Взаимосвязь с величиной вегетационного индекса (по результатам наземного спектрометрирования) // Использование и охрана природных ресурсов в России. Научно-информационный и проблемно-аналитический бюллетень. М.: Изд-во НИА-Природа, 2016. № 4. С. 29–35.

Муратова Н.Р., Бекмухамедов Н.Э. Дистанционная оценка состояния естественных пастбищ по гиперспектральным данным и на основании космоснимков разного разрешения // Электронный научно-практический журнал «Сельское, лесное и водное хозяйство». Институт космических исследований им. акад. У.М. Султангазина. <http://agro.snauka.ru/2013/01/815>. Дата посещения 20 марта 2018.

Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Вахнина О.В., Тутубалина О.В. Полевое наземное спектрометрирование луговой рас-

тительности полигона «Сатино» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 71–77.

Рулев А.С., Канищев С.Н., Шинкаренко С.С. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 113–123.

Середа И.И., Тутубалина О.В. Использование вегетационных индексов для оценки состояния посевов кукурузы на основе воздушных гиперспектральных снимков // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. М.: КДУ, 2017. С. 61–69.

Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12–15.

Строение и развитие долины р. Протвы / Под ред. Г.И. Рычагова и С.И. Антонова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 129 с.

Сучилин А.А., Репина А.С., Барышников Д.С., Васильев О.Д. Применение оборудования ГНСС на УНБ «Сатино» географического ф-та МГУ // Геопроби. 2013. № 3. С. 57.

Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Владимирова М.Р., Ли В. ГНСС в географическом образовании и прикладных исследованиях. ИнтерКарто/ИнтерГИС 23. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2017. Т. 3. С. 247–257.

Терехин Э.А. Сезонная динамика NDVI многолетних трав и ее использование для типизации их посевов на территории Белгородской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 9–17.

Gallagher K., Lawrence P. Unmanned systems and managing from above: the practical implications of UAVs for research

applications addressing urban sustainability // *Urban Sustainability: Policy and Praxis*. Springer International Publishing. 2016. P. 217–232.

Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. (2013) Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments // *Remote Sens.* 2013. V. 5(12). P. 6880–6898. doi:10.3390/rs5126880.

Sahoo R.N., Ray S.S., Manjunath K.R. Hyperspectral remote sensing of agriculture // *Current Science*. V. 108. № 5. 10 March 2015. P. 848–859.

Suchilin A.A. GNSS Reference Stations of Lomonosov MSU Faculty of Geography. M.: Book of abstracts. International Geographical Union Regional Conference, 2015. P. 237.

Поступила в редакцию 22.03.2018

После доработки 05.07.2018

Принята к публикации 08.10.2018

A.A. Suchilin¹, O.V. Vakhnina²

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF NATURAL PROCESSES USING THE UNMANNED AERIAL VEHICLES AND THE GROUND-BASED SPECTROMETRY (CASE STUDY OF THE SATINO TRAINING AREA)

The article covers main areas of recent investigations carried out by the staff of the Department of Cartography and Geoinformatics in the Satino training area in cooperation with experts from other departments. The authors focus on the development of new methods of relief surveying from unmanned aerial vehicles (UAV) and the ground-based spectrometry of vegetation.

Key words: global navigation satellite system (GNSS), differential geodetic stations (DGS), mobile complexes of GNSS, digital elevation model (DEM), normalized difference vegetation index (NDVI), field studies, valley meadows

REFERENCES

Botvich I.YU., Volkova A.I., Kononova N.A., Ivanova YU.D., Shevyrnogov A.P. Spektrometrirovaniye travyanistoj rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraja i Respubliki Khakasiya: metodika izmerenij, khraneniye i obrabotka dannykh [Spectrometry of herbaceous vegetation in the Krasnoyarsk region and the Republic of Khakassia: measurement methodology, data storage and processing] // *Reshetnevskie chteniya*. 2017. № 21–1. S. 398–400 (in Russian).

Gallagher K., Lawrence P. Unmanned systems and managing from above: the practical implications of UAVs for research applications addressing urban sustainability // *Urban Sustainability: Policy and Praxis*. Springer International Publishing. 2016. P. 217–232.

Kurkov V.M., Smirnov A.V., Inozemcev D.P. Opyt ispol'zovaniya BLA pri provedenii praktiki studentov na Zaokskom geopoligone [Experience of UAVs application during field training of students at the Zaoksky geopolygon]. M.: MIIGAIG, Geoprofi. 2014. V. 4. S. 55 (in Russian).

Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments // *Remote Sens.* 2013. V. 5(12). P. 6880–6898. doi:10.3390/rs5126880.

Miklyaeva I.M., Vakhnina O.V. Fitomassa dolinnykh lugov. Vzaimosvyaz' s velichinoy vegetatsionnogo indeksa (po rezul'tatam nazemnogo spektrometrirovaniya) [Phytomass of valley meadows. Relationship with the value of vegetation index (by the results of ground spectrometry)] // *Ispol'zovanie i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii. Nauchno-informatsionnyy i problemno-analiticheskii byulleten'*. M.: Izd-vo NIA-Priroda, 2016. № 4. S. 29–35 (in Russian).

Muratova N.R., Bekmuhamedov N.Je. Distancionnaya ocenka sostojaniya es-testvennykh pastbishh po giperspektral'nym dannym

i na osnovanii kosmosnimkov raznogo razresheniya [Remote assessment of the state of natural pastures by hyperspectral data and on the basis of satellite images of different resolutions] // *Jelektronnyj nauchno-prakticheskij zhurnal «Sel'skoe, lesnoe i vodnoe hozjajstvo»*. Institut kosmicheskikh issledovanij imeni akademika U.M. Sultangazina /http://agro.snauka.ru/2013/01/815 Data po-seshheniya 20 marta 2018 (in Russian).

Ogureva G.N., Mikljaeva I.M., Vahnina O.V., Tutubalina O.V. Polevoe nazemnoe spektrometrirovaniye lugovoj rastitel'nosti poligona «Satino» [Field ground spectrometry of meadow vegetation of the Satino training area] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 2009. № 6. S. 71–77 (in Russian).

Rulev A.S., Kanishhev S.N., Shinkarenko S.S. Analiz sezonnoj dinamiki ndvi estestvennoj rastitel'nosti Zavolz'h'ya volgogradskoj oblasti [Analysis of seasonal dynamics of NDVI for the natural vegetation of the Trans-Volga part of the Volgograd region] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13. № 4. S. 113–123 (in Russian).

Sahoo R.N., Ray S.S., Manjunath K.R. Hyperspectral remote sensing of agriculture // *Current Science*. V. 108. № 5. 10 March 2015. P. 848–859.

Sereda I.I., Tutubalina O.V. Ispol'zovanie vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki sostojaniya posevov kukuruzy na osnove vozdukhnykh giperspektral'nykh snimkov [Use of vegetation indices for the assessment of the state of maize plantings on the basis of aerial hyperspectral images] // *Nauchnye issledovaniya molodykh uchenykh-kartografov, vypolnennye pod rukovodstvom sotrudnikov kafedry kartografii i geoinformatiki geograficheskogo fakul'teta MGU imeni M.V. Lomonosova*. M.: KDU, 2017. S. 61–69 (in Russian).

Storchak I.G., Eroshenko F.V. Ispol'zovanie NDVI dlya otsenki produktivnosti ozimoy pshenitsy v Stavropol'skom krae

¹ Lomonosov Moscow State University, Department of Cartography and Geoinformatics, Senior Research Scientist; e-mail: asuhov@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Research Scientist; e-mail: vakhnina-ov@yandex.ru

[Using NDVI to assess the productivity of winter wheat in the Stavropol Krai] // *Zemledelie*. 2014. № 7. S. 12–15 (in Russian).

Stroenie i razvitie doliny r. Protvy [Structure and evolution of the Protva River valley] / Pod red. G.I. Rychagova i S.I. Antonova. M.: Izd-vo MGU, 1996. 129 s. (in Russian).

Suchilin A.A. GNSS Reference Stations of Lomonosov MSU Faculty of Geography. M.: Book of abstracts. International Geographical Union Regional Conference, 2015. P. 237.

Suchilin A.A., Ushakova L.A., Vladimirova M.R., Li V. GNSS v geografi-cheskom obrazovanii i prikladnyh issledovaniyah [GNSS in geographic education and applied research], *InterKarto/InterGIS* 23. Geoinformacionnoe obespechenie ustojchivogo razvitija territorij v usloviyah global'nyh izmenenij klimata. Materialy mezhdunarodnoj konferencii. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2017. T. 3. S. 247–257 (in Russian).

Suchilin A.A., Repina A.S., Baryshnikov D.S., Vasil'ev O.D. Primenenie oborudovaniya GNSS na UNB «Satino» geograficheskogo f-ta MGU [The use of GNSS equipment at the Satino teaching and research station of the MSU Faculty of Geography] // *Geoprofi*. 2013. № 3. S. 57.

Terekhin E.A. Sezonnaya dinamika ndvi mnogoletnikh trav i ee ispol'zovanie dlya tipizatsii ikh posevov na territorii Belgorodskoj oblasti [Seasonal dynamics of NDVI for perennial grasses and its application for elaborating the typology of their plantings in the Belgorod region] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. T. 12. № 1. S. 9–17 (in Russian).

Voskresenskij I.S., Suchilin A.A., Ushakova L.A., Shaforostov V.M., Entin A.L. GNSS i vozdušnoe zondirovanie dlja monitoringa opasnyh prirodnyh processov pri ekspluatatsii gazotransportnoj sistemy [GNSS and air sensing for the monitoring of hazardous natural processes during the operation of gas transportation system] // *Mat-ly XIII obshherossijskoj konferencii izyskatel'skih organizacij*. M.: Geomarketing, 2017. T. 1. S. 35–36 (in Russian).

Zimin M.V., Tutubalina O.V., Golubeva E.I., Ris G.U. Metodika nazemnogo spektrometrirovaniya rastenij Arktiki dlya deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov [The technique of ground-based spectrometry of Arctic plants for the interpretation of space imagery] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2014. № 4. S. 34–41 (in Russian).

Received 22.03.2018

Revised 20.09.2018

Accepted 08.10.2018