



DOI: 10.26898/0370-8799-2019-3-9

УДК: 528.952: 631.9

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

^{1,2}Павлова А.И., ¹Каличкин В.К., ¹Каличкин А.В.

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

²Новосибирский государственный университет экономики и управления
Новосибирск, Россия

Для цитирования: Павлова А.И., Каличкин В.К., Каличкин А.В. Создание цифровой модели рельефа с использованием беспилотного летательного аппарата // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2019. Т. 49. № 3. С. 70–78. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-3-9

For citation: Pavlova A.I., Kalichkin V.K., Kalichkin A.V. Sozdanie tsifrovoi modeli rel'efa s ispol'zovaniem bespilotnogo letatel'nogo apparata [Creation of the digital elevation model with the use of unmanned aerial vehicle]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2019, vol. 49, no. 3, pp. 70–78. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-3-9

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Определена необходимая последовательность этапов и осуществлена реализация беспилотной технологии создания цифровой модели рельефа на примере землепользования Новосибирской области. Технология состоит из совокупности этапов: рекогносцировки местности, закрепления опорных знаков, спутниковых измерений, аэрофотосъемочных полетов, обработки результатов аэрофотосъемки и построения цифровой модели рельефа. На технологический процесс существенно влияли неблагоприятные погодные условия — низкая облачность, порывистый ветер, высокая влажность воздуха. Дистанционные исследования с помощью беспилотного летательного аппарата самолетного типа Supercam S 250 F позволили создать крупномасштабный ортофотоплан и цифровую модель рельефа на территорию хозяйства (М 1 : 1000). Для фотограмметрической обработки цифровых данных, получаемых с беспилотного летательного аппарата, на территории хозяйства создано съемочное

CREATION OF THE DIGITAL ELEVATION MODEL WITH THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

^{1,2}Pavlova A.I., ¹Kalichkin V.K., ¹Kalichkin A.V.

¹Siberian Federal Scientific Centre
of Agro-BioTechnologies

of the Russian Academy of Sciences

Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

²Novosibirsk State University
of Economics and Management

Novosibirsk, Russia

The necessary sequence of stages has been developed and the unmanned technology for creating a digital elevation model by the example of the land use of Novosibirsk region has been implemented. The technology consists of a set of stages: reconnaissance of the terrain, fixing reference signs, satellite measurements, aerial photography flights, processing the results of aerial photography and the construction of digital elevation model. The technological process was significantly affected by unfavorable weather conditions - low clouds, gusty wind, high air humidity. Remote sensing study with the use of unmanned aerial vehicle of the Supercam S 250 F type made it possible to create a large-scale orthophotoplan and a digital elevation model on the farm territory (M 1 : 1000). For photogrammetric processing of digital data obtained on the farm, a two-stage method of satellite determination was used. The essence of this method was to obtain

обоснование в виде сети опорных пунктов. Для обработки данных использован двухэтапный метод спутниковых определений. Суть данного метода состояла в получении большого количества спутниковых измерений в статическом режиме и дальнейшей статистической обработке. При статистической обработке спутниковых измерений использованы сведения о координатном местоположении двух базовых наземных станций спутниковой сети Новосибирской области – Коченево и Новосибирск. Удаленность опорных пунктов от наземной спутниковой станции Новосибирск составила более 90 км. В результате уравнительных вычислений полученные средние квадратические ошибки смещений планового и высотного положения опорных пунктов в различных полигонах составили в плане менее 0,02 м, по высоте – менее 0,03 м. В процессе фотограмметрической обработки результатов аэрофотосъемки с беспилотным летательным аппаратом решались задачи перевода положения точек на цифровом снимке в систему пиксельных координат в систему координат местности, построение по ним цифровых нерегулярных и регулярных моделей поверхности, а на их основе текстурированных моделей местности и ортофотопланов.

Ключевые слова: беспилотные технологии, беспилотный летательный аппарат, ортофотоплан, цифровая модель рельефа, спутниковые измерения

ВВЕДЕНИЕ

Роль рельефа в формировании агроэкологических условий сельскохозяйственных земель общепризнана. Изменения рельефа в пространстве и во времени оказывают влияние на агроклиматические условия, сток поверхностных вод, эрозионные процессы и др. [1, 2]. Развитие современных технологий обработки информации дает возможность формализованного описания рельефа, представления этой информации в удобном для моделирования виде. Одним из возможных решений представляется использование количественных характеристик рельефа [3, 4], а также непрерывных цифровых данных высот высоко пространственного разрешения (high-resolution, continuous, digital

a large number of satellite measurements in a static mode and further statistical processing. For statistical processing of satellite measurements, information was used on the coordinate location of two base ground stations of the Novosibirsk Region satellite network - Kochenevo and Novosibirsk. Remoteness of support points from the ground satellite station of Novosibirsk was at a distance of over 90 km. As a result of equalization calculations, the obtained average square displacement errors of the planned and high-altitude position of the support points in various test sites were under 0.02 m in the plan, and under 0.03 m by height. In the process of photogrammetric processing of the results of aerial photography with the use of unmanned aerial vehicle, the tasks of transferring the position of points on a digital image in the pixel coordinate system into the coordinate system of the area, building digital irregular (TIN, Triangulated Irregular Network) and regular (DEM, Digital Elevation Model) surface models, and based on them, textured terrain models (TTM, Textured Terrain Model) and orthophotoplans, were solved.

Keywords: unmanned technologies, unmanned aerial vehicle, orthophotoplan, digital elevation model, satellite measurements.

elevation data) и разработка новых компьютеризированных методов анализа [5].

В настоящее время применяется морфодинамический метод, обладающий возможностями математического анализа данных о рельефе [6–8]. В общем виде морфодинамический анализ позволяет разделить территорию на элементарные поверхности (ЭП), ограниченные структурными линиями и характерными точками. ЭП обладают сходными генетическими свойствами, а также одинаковым влиянием водных, литодинамических потоков и терморегима склонов на формирование и свойства почв. Применение метода ручным способом по топографической карте является сложной процедурой, связанной с трудностями определения границ между континуальными

формами поверхности. Однако применение метода в сочетании с моделированием рельефа позволяет оперировать цифровой матрицей высот и автоматизированно вычислять различные параметры рельефа. Этот метод мы впервые применили для задач классификации сельскохозяйственных земель [9]. На современном этапе в сравнении с картографическими материалами более актуальную информацию о рельефе можно получить с использованием данных дистанционного зондирования земли – глобальных цифровых моделей рельефа (ASTER GDEM, SRTM, ALOS DSM и др.)¹ [10, 11]. Однако для агроэкологической оценки сельскохозяйственных земель и их классификации на внутрихозяйственном уровне применение этих моделей ограничивается из-за низкой разрешающей способности.

В связи с этим актуальны исследования по разработке технологий получения цифровых моделей рельефа (ЦМР) на основе применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Такие возможности появились с начала 1990-х годов XX в. благодаря появлению цифровых фотокамер, характеристики которых позволили заменить аэрофотоаппараты. Активность использования БПЛА вызвана легкой развертываемостью, мобильностью, оперативностью, низкой стоимостью и возможностью использования полезной нагрузки для получения данных сверхвысокого пространственного разрешения [12–14]. По сообщению в работе [15], ортофотопланы, полученные с помощью БПЛА, оценены различными пространственными тестами качества, используемыми национальными картографическими агентствами, и получили высокую оценку.

Цель исследований – разработать необходимую последовательность этапов и осуществить реализацию беспилотных технологий для создания цифровой модели рельефа землепользования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории землепользования ЗАО «Мирный» Коченевского района Новосибирской области (54°56'24"с.ш., 82°06'12"в.д.). На землях хозяйства исследовано два ключевых участка общей площадью 1639 га, различающихся по рельефу.

Для выполнения аэрофотосъемки использовали легкий БПЛА самолетного типа Supercam S 250 F массой 5 кг и с дальностью радиуса радиосигнала до 70 км. БПЛА приобретен на средства федерального бюджета по Программе развития СФНЦА РАН. Оснащен беззеркальной фотокамерой с объективом Sony A6000. Фотокамера имеет матрицу для записи данных Exmor APS HD CMOS, быстрый гибридный автофокус, процессор Bionz X, матрицу APS-C с разрешением 24 Мп (мегапикселей), электронный видеискатель. Фотокамера Sony обладает различными режимами фокусирования на автоматический, ручной, покадровый, непрерывный и полуавтоматический объекты. Процессор Bionz X позволяет улучшать изображение и снижать уровень шума для получения качественных снимков.

Для фотограмметрической обработки цифровых данных, получаемых с БПЛА, создали съемочное обоснование в виде сети опорных пунктов, которое представляет собой специально установленные геодезические знаки. Сеть пунктов съемочного обоснования стала основой для последующей фотограмметрической обработки цифровых снимков. В исследованиях использован двухэтапный метод спутниковых определений: получение большого количества спутниковых измерений и дальнейшая статистическая обработка с определением координат точек съемочного обоснования.

В процессе фотограмметрической обработки результатов аэрофотосъемки с

¹U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

БПЛА решались задачи перевода положения точек на цифровом снимке в систему пиксельных координат в систему координат местности, построение по ним цифровых нерегулярных (TIN, Triangulated Irregular Network) и регулярных (DEM, Digital Elevation Model) моделей поверхности, а на их основе текстурированных моделей местности (TMM, Textured Terrain Model) и ортофотопланов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основная суть технологии получения ЦМР на основе применения беспилотного летательного аппарата заключается в последовательном выполнении этапов, предусмотренных инструкцией по фотограмметрическим работам². В ходе выполнения работ создано съёмочное обоснование (июнь 2018 г.), выполнена аэрофотосъёмка местности (октябрь 2018 г.), созданы ортофотоплан местности и цифровые модели рельефа (ноябрь 2018 г.).

Построение съёмочного обоснования предусматривало рекогносцировку местности, закрепление пунктов опорными знаками, выполнение спутниковых измерений, вычислительную обработку по получению координат пунктов съёмочной сети. Рекогносцировку местности производили с целью предварительного выбора расположения и закрепления опорных пунктов, выбора стартовой площадки для выполнения аэрофотосъёмочных полетов. Спутниковые измерения осуществляли в статическом режиме с использованием высокоточного геодезического приемника TRIUMPH-LS.

С помощью встроенного программного обеспечения анализировали помехи в процессе измерений с определением частот сигнала спутников глобальных навигационных систем: Global Position Systems (GPS) и ГЛОНАСС.

Спутниковые наблюдения реализуются в простых по функциональным возможностям одночастотных GPS-приемниках с реализацией C/A кода или в двухчастотных приемниках реализуется P-код с сигналами частот L1 и L2. Современный многоканальный GPS-приемник TRIUMPH-LS характеризуется возможностями взаимодействия с большим числом спутниковых систем для выполнения достаточного количества избыточных измерений. В статическом режиме измерений приемник располагался в точке съёмочного обоснования (опорный пункт) в течение одного часа. По завершении сеансов наблюдений осуществляли запись файлов измерений в рабочий проект TRIUMPH-LS с предварительной проверкой объема файлов, отображения местоположения на карте. В результате уравнительных вычислений определяли плановые и высотные координаты опорных пунктов с учетом известного координатного местоположения двух базовых наземных станций спутниковой сети Новосибирской области – Коченево и Новосибирск. При удаленности опорных пунктов от наземной спутниковой станции Новосибирск на расстоянии более 90 км полученные величины смещений планового и высотного положения опорных пунктов в различных полигонах (геодезическая фигура, используемая в уравнительных вычислениях спутниковых измерений) оказались меньше допустимых, а полученные величины средних квадратических ошибок (СКО) составили в плане менее 0,02 м, по высоте – менее 0,03 м (см. табл. 1).

Аэрофотосъёмку с применением БПЛА проводили при высоте над подстилающей поверхностью 170–200 м с поперечным перекрытием снимками, равным 60% согласно³. В процессе фотограмметрической

²Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. URL: http://www.opengost.ru/iso/07_gosty_iso/07040_gost_iso/2685-gkinp-02-036-02-gnta-02-036-02-instrukciya-po-fotogrammetricheskim-rabotam-pri-sozdanii-kart.html

³Основные положения по аэрофотосъёмке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов. ГКИНП-09-32-80. URL: http://www.opengost.ru/iso/07_gosty_iso/07040_gost_iso/2704-gkinp-09-32-80-osnovnye-polozheniya-po-aerofotosemke-vypolnyaemoy-dlya-obnovleniya-kart-i-planov.html

Табл. 1. Координаты опорных пунктов и результаты оценки точности положения пунктов
Table 1. Coordinates of support points and results of accuracy assessment of the points' position

Опознак	СКО, м	
	в плане	по высоте
ОР30	0,004	0,007
ОР31	0,005	0,009
ОР32	0,005	0,007
ОР33	0,006	0,009
ОР34	0,006	0,011
ОР40	0,009	0,014
ОР41	0,008	0,010
ОР70	0,004	0,007
ОР71	0,005	0,007
ОР72	0,005	0,007

обработки получены координаты большого количества точек на цифровых снимках, а также 3D-модель текстурированной поверхности и ортофотоплан.

В результате цифровой обработки аэрофотосъемки созданы крупномасштабные ортофотопланы территории исследований (М 1 : 1000) и ЦМР с высотой сечения 0,5 м. При низкой облачности наблюдается слабая пропускная способность радиосигнала между спутниковым приемником БПЛА и наземной спутниковой станцией

или радиосигнал отсутствует. Вследствие этого часть снимков невозможно обработать (на рис. 1, а необработанные снимки показаны красным цветом). На ортофотоплане (см. рис. 1, б) отображены тени от облаков и «пропуски», соответствующие низким облакам. Определено, что при низкой облачности выполнять аэрофотосъемку местности нельзя.

Был выполнен сравнительный анализ ЦМР, построенных по космическому снимку ALOS DSM и крупномасштабным ортофотопланам. Космический снимок ALOS DSM характеризуется пространственным разрешением ячейки растра 30 м и содержит артефакты, связанные с отображением понижений и депрессий. В связи с этим осуществлена коррекция исходной цифровой модели рельефа с помощью алгоритма Priority-Flood Algorithm, PFA [16]. Это позволило устранить артефакты и построить гидрологически корректную цифровую модель рельефа.

Для сравнительного анализа ЦМР использованы основные статистические показатели для двух ключевых участков: минимальная и максимальные абсолютные высоты, среднее значение высоты и стандартное отклонение. В табл. 2 приведены показатели исходной ЦМР на основе космического снимка (ЦМР1) скорректированной цифро-

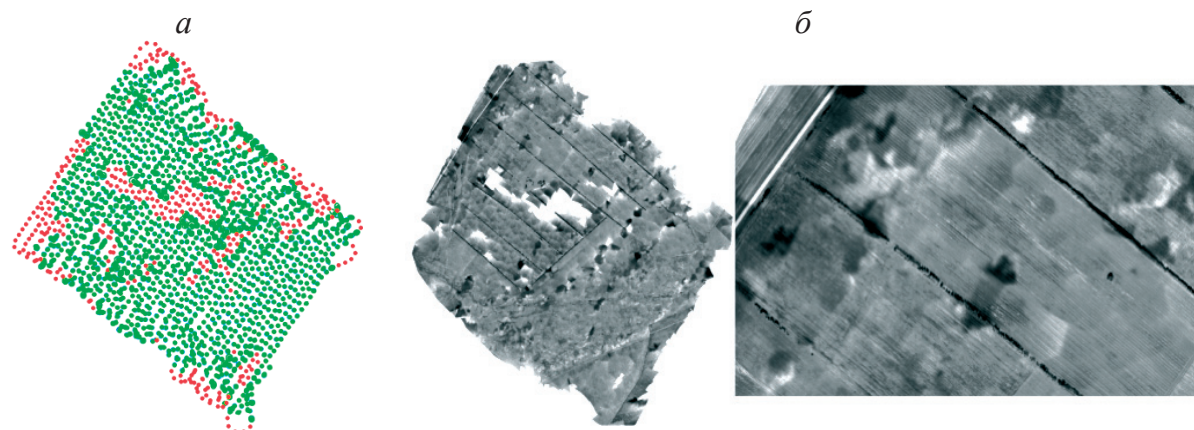


Рис. 1. Результаты влияния низкой облачности на построение ортофотоплана
Fig. 1. Results of the effect of low clouds on building orthophotoplan

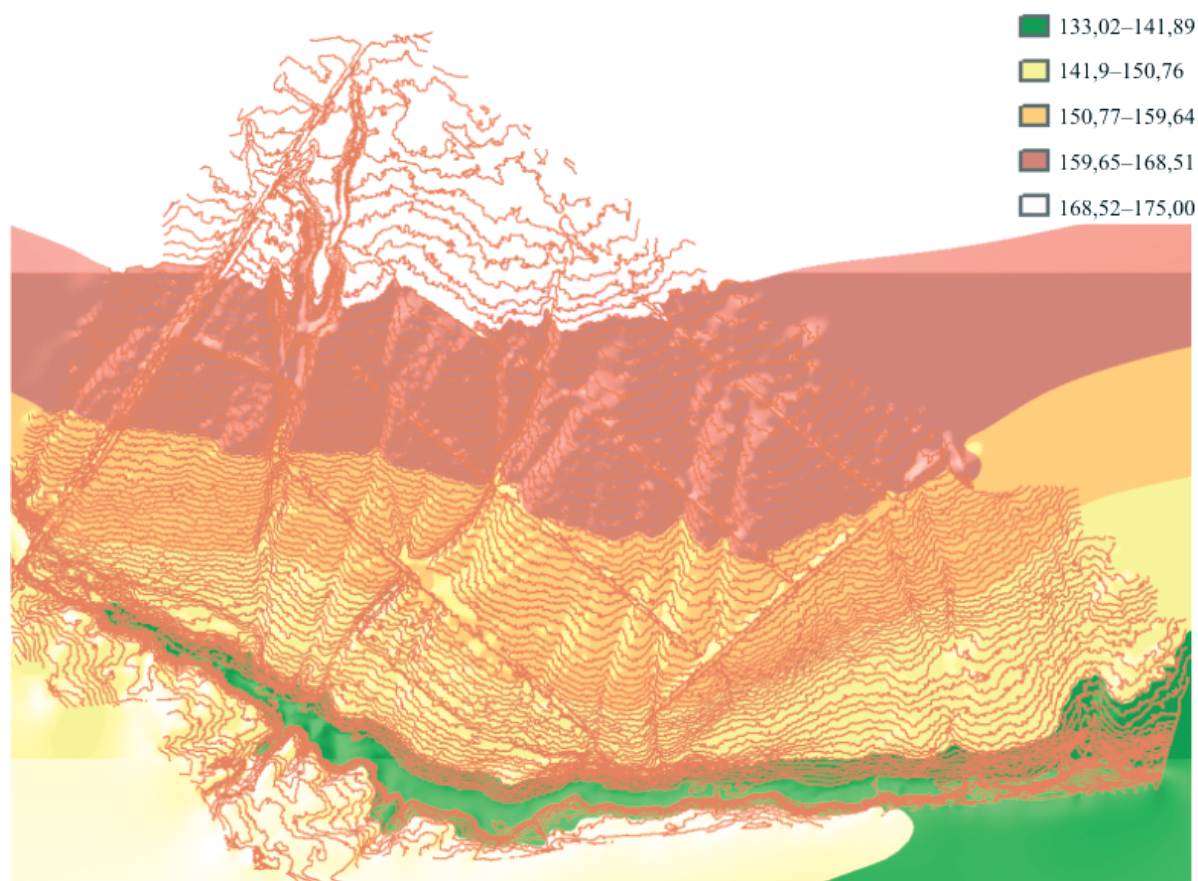


Рис. 2. Цифровая модель рельефа первого ключевого участка (абсолютные высоты, м)

Fig. 2. Digital elevation model of the first key site (absolute elevation, m)

Табл. 2. Основные показатели цифровых моделей рельефа, построенных на основе космического снимка и результатов аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата

Table 2. The main data of digital elevation models built on the basis of a space photograph and aerial photography results from the unmanned aerial vehicle

Показатель, м	ЦМР1		ЦМР2		ЦМР3	
	Участок					
	первый	второй	первый	второй	первый	второй
Минимальное значение высоты	124,00	137,00	134,63	145,93	133	147
Максимальное значение высоты	180,00	180,00	172,42	173,21	174	174
Среднее значение высоты	148,49	154,72	158,40	158,51	159,1	159,0
Стандартное отклонение	11,39	6,69	9,26	4,47	8,86	4,85

вой модели рельефа (ЦМР2) и ЦМР, полученной на основе применения беспилотного летательного аппарата (ЦМР3).

Цифровая модель рельефа, построенная с применением космического снимка ALOS DSM, характеризуется более низким пространственным разрешением в

сравнении с результатами аэрофотосъемки БПЛА. Это приводит к ошибкам вычислений абсолютных высот и связанных с ними производными параметрами рельефа: значения абсолютных высот на первом участке отличаются на 10,5 м при стандартном отклонении 11,39 м, на втором – до

4,3 м при стандартном отклонении, равном 4,85 м. Скорректированная модель рельефа не содержит артефактов, однако средние значения высот в сравнении с ЦМРЗ на первом участке различаются на 0,7 м, на втором – на 0,5 м (см. табл. 2).

Вследствие низкого пространственного разрешения на космическом снимке не отражаются микроформы рельефа. Например, на первом ключевом участке встречаются ложбины стока, имеющие выраженный уклон к речке Шариха.

Таким образом, в результате дистанционного зондирования с использованием БПЛА самолетного типа Supercam S 250 F построена цифровая модель рельефа в растровой и векторной моделях данных геоинформационных систем с высотой сечения рельефа 0,5 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование БПЛА и методов анализа данных позволяет оперативно, в отличие от традиционных подходов наземной топографической съемки, получать ортофотопланы и ЦМР крупного масштаба для сельскохозяйственной оценки земель, почвенного картографирования и др. Для этого необходимо выполнение технологических процессов, предусматривающих полевую рекогносцировку и закрепление опорных знаков на местности, спутниковые измерения по определению координат опознаков и последовательных уравнительных вычислений, аэрофотосъемочные полеты, а также камеральные работы по обработке результатов аэрофотосъемки и построению ЦМР. При этом на качество ортофотопланов оказывают значительное влияние погодные условия: сильный порывистый ветер, облачность, дождь, высокая влажность воздуха и др. Технология позволяет создавать ЦМР с более высоким пространственным разрешением в сравнении с глобальными цифровыми моделями высот и изучать особенности рельефа территории хозяйства на мезо- и микроуровнях.

Применение БПЛА позволяет оперативно выполнить аэрофотосъемку местности, построить крупномасштабные карты, включающие актуальные сведения о рельефе и объектах топографии. При отсутствии крупномасштабных топографических карт внутрихозяйственного землепользования беспилотная технология служит альтернативным и эффективным инструментом построения ЦМР. При этом необходимо понимать, что для создания ортофотопланов требуется привлечение высококвалифицированных специалистов, обладающих специальными знаниями в области космической геодезии, геоинформатики, фотограмметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Танасиенко А.А.* Специфика эрозии почв в Сибири: монография. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 175 с.
2. *Рейнгард Я.Р.* Деградация почв экосистем юга Западной Сибири. Омск, Лодзь (Польша), 2009. 634 с.
3. *Hengl T., Evans I.S.* Mathematical and digital models of the land surface // *Developments in soil science*. 2009. Vol. 33. P. 31–63. DOI: 10.1016/s0166-2481(08)00002-0.
4. *James L.A., Hodgson M.E., Ghoshal S., Latiolais M.M.* Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis // *Geomorphology*. 2012. Vol. 137. N 1. P. 181–198. (DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.039)
5. *Florinsky I.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Academic Press, 2016. 486 p.
6. *Ласточкин А.Н.* Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем): монография. СПб.: Издательство СПбГУ, 2002. 762 с.
7. *Шарый П.А.* Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2006. Т. 8. № 2. С. 459–473.
8. *Grohmann C.H.* Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R // *Computers & Geosciences*. 2004. Vol. 30. N 9–10. P. 1055–1067. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.08.002.

9. Каличкин В.К., Павлова А.И. Агрономические геоинформационные системы: монография. Новосибирск: Издательство СФНЦА РАН, 2018. 347 с.
10. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation By ALOS PRISM // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-4. P. 71–76. URL: https://www.aw3d.jp/wp/wp-content/themes/AW3DEnglish/technology/doc/pdf/technology_03.pdf
11. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M. Validation of AW3D Global DSM Generated from ALOS PRISM // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. III-4. P. 25–31. URL: https://www.aw3d.jp/wp/wp-content/themes/AW3DJapanese/technology/doc/pdf/technology_01.pdf
12. Tahar K.N. Multi rotor UAV at different altitudes for slope mapping studies // International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. 40. N 1. P. 9–16. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-9-2015.
13. Krsak B., Blistan P., Paulikova A., Puskarova P., Kovanic L., Palkova J., Zeliznakova V. Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study // Measurement. 2016. Vol. 91. P. 276–287. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.028
14. Rinaudo F., Chiabrando F., Lingua A., Spanm A. Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. (XXII ISPRS Congress). 2012. Vol. 39. N B5. P. 583–588. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-583-2012.
15. Mesas-Carrascosa F.J., Rumbao I.C., Berrocal J.A.B., Porras A.G.-F. Positional quality assessment of orthophotos obtained from sensors onboard multi-rotor UAV platforms // Sensors. 2014. Vol. 14. N 12. P. 22394–22407. DOI: 10.3390/s141222394.
16. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // International Journal of Geographical Information Science. 2006. Vol. 20. N 2. P. 193–213. DOI: 10.1080/13658810500433453)

REFERENCES

1. Tanasienko A.A. Spetsifika erozii pochv v Sibiri: monografiya. [Specificity of soil erosion in Siberia] Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN [Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences], 2003, 175 p. (In Russian).
2. Reinhard J.R. Degradatsiya pochv ekosistem yuga Zapadnoy Sibiri. [Soil degradation of ecosystems of the south of Western Siberia]. Omsk, Lodz (Poland), 2009, 634 p. (In Russian).
3. Hengl T., Evans I.S. Mathematical and digital models of the land surface. *Developments in soil science*, 2009, vol. 33, pp. 31–63. DOI: 10.1016 / s0166-2481 (08) 00002-0.
4. James L.A., Hodgson M.E., Ghoshal S., Latiolais M.M. Geomorphic change detection using historic geography and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, 2012, vol. 137, no. 1, pp. 181–198. DOI: 10.1016 / j.geomorph. 2010.10.039
5. Florinsky I. Digital terrain analysis in soil science and geology. *Academic Press*, 2016, 486 p.
6. Lastochkin A.N. Sistemno-morfologicheskoye osnovaniye nauk o Zemle (geotopologiya. strukturnaya geografiya i obshchaya teoriya geosistem). [The system-morphological basis of earth sciences (geotopology, structural geography and the general theory of geosystems)] SPb: Izdatelstvo SPbGU [St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ.], 2002, 762 p. (In Russian).
7. Shary P.A. Geomorfometriya v naukakh o zemle i ekologii. obzor metodov i prilozheniy [Geomorphometry in earth sciences and ecology, review of methods and applications]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2006, vol. 8, no. 2, pp. 459–473. (In Russian).
8. Grohmann C.H. Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. *Computers & Geosciences*, 2004, vol. 30, no. 9–10, pp. 1055–1067. DOI: 10.1016 / j.cageo 2004.08.002.
9. Kalichkin V.K., Pavlova A.I. Agronomicheskiye geoinformatsionnyye sistemy: monografiya [Agronomic geographic information systems]. Novosibirsk: Izdatelstvo SFNTSA RAN [Novo-

- sibirsk: SFSCA RAS Publ.], 2018, 347 p. (In Russian).
10. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation By ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, vol. II-4, pp. 71–76. URL: https://www.aw3d.jp/wp/wp-content/themes/AW3DEnglish/technology/doc/pdf/technology_03.pdf
 11. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M. Validation of AW3D Global DSM Generated from ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, vol. III-4, pp. 25–31. URL: https://www.aw3d.jp/wp/wp-content/themes/AW3DJapanese/technology/doc/pdf/technology_01.pdf
 12. Tahar K.N. Multi rotor UAV at different altitudes for slope mapping studies. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, Vol. 40, no. 1, pp. 9–16. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-9-2015.
 13. Krsak B., Blistan P., Paulikova A., Puskarova P., Kovanic L., Palkova J., Zeliznakova V. Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*, 2016, vol. 91, pp. 276–287. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.028.
 14. Rinaudo F., Chiabrando F., Lingua A., Spant A. Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. (XXII ISPRS Congress)*, 2012, vol. 39, no. B5, pp. 583–588. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-583-2012.
 15. Mesas-Carrascosa F.J., Rumbao I.C., Berrocal J.A.B., Porras A.G.-F. Positional quality assessment of orthophotos obtained from sensors onboard multi-rotor UAV platforms. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 12, pp. 22394–22407. DOI: 10.3390/s141222394.
 16. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2., pp. 193–213. DOI: 10.1080/13658810500433453.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлова А.И., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент; e-mail: annstab@mail.ru

✉ **Каличкин В.К.**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 463; e-mail: kvk@ngs.ru <mailto:kvk@ngs.ru>; annstab@mail.ru

Каличкин А.В., научный сотрудник

AUTHOR INFORMATION

Pavlova A.I., Candidate of Science in Engineering, Lead Researcher, Associate Professor; e-mail: annstab@mail.ru

✉ **Kalichkin V.K.**, Doctor of Science in Agriculture, Professor, **address:** PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: kvk@ngs.ru

Kalichkin A.V., Researcher

*Дата поступления статьи 27.04.2019
Received by the editors 27.04.2019*