

**Воскресенский И.С.* , Сучилин А.А., Ушакова Л.А.,
Шафоростов В.М., Энтин А.Л.**

*географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, г. Москва
e-mail: isvoskresensky@rambler.ru

МОНИТОРИНГ РЕЛЬЕФА ТРАССЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА В ЦЕНТРЕ РУССКОЙ РАВНИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Эколого-геоморфологическая оценка объектов – проектируемых и эксплуатируемых магистральных трубопроводов в Европейской части России, Сибири и Дальнем Востоке показала, что линейные участки трасс обладают вновь созданным техногенным (антропогенным) рельефом. Изменения в морфологии форм рельефа, сложенных слабоуплотненными искусственными грунтами, приводят к проявлению рельефообразующих процессов. Как правило, на участках трассы возникает парагенез экзогенных рельефообразующих процессов (например, склоновая эрозия и оползание), который был не свойственен существовавшим до строительства природным условиям (уклонам поверхности, растительному покрову, литологии рыхлых новейших отложений и т.п.). Проявления современных рельефообразующих процессов могут иметь потенциально опасный характер для эксплуатации трубопровода. Оперативное выявление форм рельефа, формирующихся экзогенными рельефообразующими процессами на ранней стадии их образования, позволяет своевременно определить соответствующие меры инженерной защиты магистрального трубопровода. Мониторинг рельефа участка трассы газопровода в центре Русской равнины проводился с применением дистанционных и геоинформационных методов. В результате ранее проведенных исследований долины р. Протва было установлено, что трубопровод после «перехода» через русло последовательно пересекает бечевник, крутой и пологий склон террасовала на правом борту долины. Террасовал сложен аллювием среднелепестового возраста, который перекрыт склоновыми суглинками. На крутом склоне террасовала протекают оползневые процессы, а на пологом – массовое смещение склонового материала («крип» – «сгеер»). После строительства трубопровода и в результате проведенной рекультивации на рассматриваемом участке сформирован пологий склон. В настоящее время он преобразуется эрозионными и оползневыми рельефообразующими процессами. На склоне сформировалась сеть эрозионных рытвин и террасовидная площадка оползня. Изменения рельефа были выявлены при наземном обследовании. Пространственное распространение форм рельефа на участке газопровода было получено с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и высокоточных мобильных комплексов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Накопление и систематизация полученных данных производилась в среде геоинформационной системы (ГИС) данного объекта. Систематические наблюдения позволят в дальнейшем оценить динамику форм рельефа объектов магистрального трубопровода.

Ключевые слова: магистральный трубопровод газа, антропогенный рельеф, эрозия, оползень, беспилотный летательный аппарат, глобальная навигационная спутниковая система, геоинформационная система.

Voskresensky I.S.*, Suchilin A.A., Ushakova L.A., Shaforostov V.M., Entin A.L.

Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University,
Russia, Moscow, *e-mail: isvoskresensky@rambler.ru

Relief monitoring under main pipeline route in the center of the Russian plain with remote sensing and GIS methods

The eco-geomorphological assessment of the projected and operated major pipelines in the European part of Russia, Siberia, and the Far East shows that linear sections of the traces have a newly created technogenic (anthropogenic) relief. Changes in the morphology of the relief forms composed of weakly compacted artificial ground lead to the manifestation of relief-forming processes. As a rule, paragenesis of exogenous relief-forming processes (for example, slope erosion and landslide), which was not characteristic of pre-existing natural conditions (surface slopes, vegetation cover, lithology of loose new sediments, etc.) occurs on the sections of the route. Manifestations of modern relief-forming processes are potentially dangerous for pipeline operation. The rapid identification of landforms produced by exogenous relief-forming processes at the early stage of their formation makes it possible to plan proper engineering protection of the main pipeline. Monitoring of the relief under the section of the gas pipeline route in the center of the Russian Plain was carried out with remote sensing and geoinformation methods. Previous studies of the Protva Valley have shown that pipeline, after crossing the river, also sequentially crosses terrace, steep and gentle terrace slopes. Terraces are composed of alluvium of middle Middle Pleistocene age, which is covered by slope loams. Landslide processes occur on the steep slope of the terraces, and mass displacement of slope material ("creep") is seen on the gentle slope. After pipeline construction, as a result of the remediation, a gentle slope is formed in the considered area. Now it is transformed by water erosion and landslide processes. A network of erosion ruts and a terrace-like landslide have formed on the slope. Landform changes were revealed during the ground survey. The spatial distribution of the landforms under the gas pipeline section was studied with unmanned aerial vehicles (UAV) and high-precision mobile complex of global navigation satellite system (GNSS). Accumulation and systematization of the received data was carried out in the GIS of the study object. Future systematic observations will allow assessment the dynamics of the landforms under the pipeline.

Key words: Gas main pipeline, relief, erosion, landslide, Unmanned aerial vehicles, Global navigation satellite system, Geoinformation system.

Воскресенский И.С.*, Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.А.

М.В. Ломоносов атындағы ММУ, география факультеті,
Ресей, Мәскеу қ., *e-mail: isvoskresensky@rambler.ru

Қашықтық және геоақпараттық әдістерді қолдану арқылы орталық Орыс жазығымен өтетін магистралды құбыр трассасы бойындағы жер бедерінің мониторингі

Ресейдің Еуропалық бөлігінде, Сібірде және Қиыр шығыстағы жобалық және қолданыстағы магистралды құбыр объектілерінің экологиялық-геоморфологиялық бағалануы трассалардың сызықтық бөлімшелері жаңадан қалыптасқан техногенді (антропогенді) бедерімен сипатталады. Жасаңды грунттармен әлсіз тығыздалған жер бедері морфологиясындағы өзгерістер бедертүзуші үдерістердің жол алуына апарады. Басым жағдайда трасса учаскелерінде құрылыс алдында жергілікті табиғи жағдайларға тән емес (жербеті еңістігіне, өсімдік жамылғысына, жаңа борпылдақ шөгінділердің литологиясына және с.с.) экзогенді бедертүзуші үдерістер парагенезінің (мысалы, беткейлік эрозия мен жылжулар) қалыптасуына апарады. Қазіргі бедертүзуші үдерістердің орын алуы құбырлардың пайдаланылуына өте қауіпті болып келеді. Экзогенді бедертүзуші үдерістермен алғашқы кезеңде қалыптасқан бедер пішіндерінің тез арада анықталуы магистралды құбырды инженерлік қорғаудың сәйкесті шараларын уақытында белгілеуге мүмкіндік береді. Орталық орыс жазығындағы құбыр трассасы учаскесіндегі жер бедерінің мониторингі арақашықтық және геоақпараттық әдістерді қолдану арқылы жүргізілді. Протва өзені аңғарында алдын ала жүргізілген зерттеулер нәтижесінде, өзен арнасын кесіп өткеннен кейін құбыр желісі жағалаудан асып, оң жағында тік және жайпақ бетпейінен өтеді. Террасалық жон беткейлік саздақтармен жамылған ортанеоплейстоцен жасындағы аллювиймен құралған. Террасалық жонның тік беткейінде жылжыма үдерістер, ал жайпақ беткейде беткейлік материалдың тұтас жылжуы жүріп отыр («крип» – «среер»). Құбыр салынғаннан кейін және жүргізілген рекультивациялық жұмыстар нәтижесінде қарастырылып отырған учаскеде жайпақ беткей қалыптасқан. Қазіргі уақытта ол эрозиондық және жылжымалы бедертүзуші үдерістермен өзгертіліп отыр. Беткейде эрозиондық жырықтар торы және жылжыманың терраса тәрізді

алаңы қалыптасты. Бедердің өзгерістері далалық бақылаулар нәтижесінде анықталған. Құбыр учаскесіндегі бедер пішіндерінің кеңістіктік таралуы пилотсыз ұшқыш аппараттар (ПҰА) және ғаламдық навигациялық серіктестер жүйесінің (ГНСЖ) дәлдігі жоғары мобильді кешендері көмегімен анықталды. Табылған мәліметтердің жинақталуы және жүйеленуі алынған нысанның геоақпараттық жүйе (ГАЗ) ортасында жүргізіліп отырды. Жүйелі бақылаулар болашақта магистралды құбыр нысандары жолағында бедер пішіндерінің динамикасын бағалауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: газдың магистралды құбыры, антропогенді бедер, эрозия, жылжыма, пилотсыз ұшқыш аппараты, ғаламдық навигациялық серіктестер жүйесі, геоақпараттық жүйе.

Введение

По согласованию с территориальной производственной организацией «Газпрома» России сотрудники Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова провели в 2017 г. геоморфологическое исследование участка магистрального газопровода, расположенного в центре Русской Равнины (Калужская область). В данной статье излагаются результаты исследования, цель которого заключалась в совершенствовании методики применения геоинформационных технологий и методов дистанционного зондирования в комплексе с наземными наблюдениями за техногенным рельефом и опасными рельефообразующими процессами (оползание и эрозия временных водотоков) на участке действующего магистрального газопровода.

К настоящему времени на территории Европейской территории России (ЕТР) сформирована обширная сеть магистральных трубопроводов, обеспечивающих транспортировку природного газа от месторождений, расположенных в Западной Сибири и различных частях ЕТР, до российских и зарубежных потребителей (Единая система газоснабжения России, 2016). Магистральный трубопровод газа является сложной природно-технической системой, включающей инженерные сооружения и природные объекты (Королев, 2007; Mohitpour, Golshan, Murray, 2003). В пределах Русской равнины магистральные трубопроводы пересекают разнообразные по морфологии и строению формы рельефа ледникового, флювиального, карстового происхождения (Геоморфологическое районирование..., 1980; Шарапов, 2010). При строительстве магистральных трубопроводов на Русской Равнине изменениям подвергаются, главным образом, морфология аллювиальных террас в долинах рек и склонов междуречий и рыхлые отложения их слагающие (Волков, 2009). В свою очередь это приводит к активизации современных рельефообразующих процессов и неблагоприятным изменениям эколого-геоморфологической

обстановки (Кружалин, 2001; Ермолов, 2014). Существенную опасность для трубопроводов представляют оползни, эрозионные рытвины и овраги, которые образуются на техногенных склонах. Последние формируются при рекультивации территории трассы после строительства (Глазунов, Бурлуцкий, 2014; Формирование оползней..., 1987 в пределах землеотвода трассы). Они приводят к изменениям дневной поверхности, разрушению форм рельефа с последующим «вскрытием» трубопровода. Совершенствование методов выявления изменений форм рельефа позволяет на ранней стадии их формирования не только зафиксировать нарушения дневной поверхности, но и своевременно принять меры по защите от опасных процессов. Это позволит повысить безопасность трубопровода на тех участках, где трасса подвергается воздействию оползней и эрозии (Мазур, Иванцов, 2004; Баборькин, 2013).

При небольших размерах участков мониторинга и необходимости оперативного получения качественной и количественной информации о рельефе земной поверхности оптимальным методом дистанционного зондирования является съёмка при помощи беспилотных летательных аппаратов (Smith, Chandler, Rose, 2009; Hackney, Clayton, 2015). Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются относительно новым, но активно применяемым инструментом географических исследований. Это обусловлено относительно невысокой стоимостью аппаратов, а также развитием компьютерной техники, в частности, технологии «структура из движения» (англ. Structure-from-motion), объединяющей классическую фотограмметрию с методиками компьютерного зрения (Ullman 1979, Koenderink and van Doorn 1991). «Структура из движения» позволяет автоматически определять соответственные точки на стереопарах снимков и, таким образом, создавать плотное облако точек, на основе которого можно получить высокодетальные цифровые модели рельефа (Rock et al. 2012, Westoby et al. 2012, Fonstad et al. 2013,

Tonkin et al. 2014). Применимость съёмки с БЛА для мониторинга рельефа небольших площадок была неоднократно показана для различных типов местности, подверженных разным опасным геоморфологическим процессам, включая оползание (Niethammer et al. 2010, Lucieer et al. 2014, Turner et al. 2015) и овражную эрозию (D'Oleire-Oltmanns et al. 2012, Kaiser et al. 2014, Smith and Vericat 2015).

Для получения точных и достоверных цифровых моделей рельефа по материалам съёмки с БЛА обязательно необходимо надёжное плано-высотное обоснование (James et al. 2017). Геопространственная фиксация наземных опорных знаков плано-высотного обоснования участка исследования проводилась с использованием приборов геодезического класса швейцарской компании Leica GeoSystems. Измерения проводились мобильным двухчастотным комплексом ГНСС (антенна GS08, приемник CS10), а затем полученные «накопления» уравнивались относительно референц-станций ГНСС факультета (антенна AR10, приемник GR10), что позволило получить их однозначные координаты сантиметровой точности. При отсутствии наземной привязки реконструкция трёхмерной модели методом «структуры из движения» возможна, но метрические характеристики получаемой модели ненадёжны, что позволяет проводить только качественный анализ (Carbonneau and Dietrich 2017).

Материалы и методы исследования

Мониторинг рельефа проводился в конце июня 2017 г. на участке магистрального газопровода на севере Калужской области. Участок мониторинга расположен на правом берегу р. Протвы в 1 км северо-западнее д. Бердовка. Участок имеет длину около 110 м, ширина варьирует от 30 м до 50 м (рисунок 1).

Мониторинг рельефа состоял из следующих этапов: изучение архивных материалов дистанционного зондирования; воздушное дистанционное зондирование; наземное детальное геоморфологическое обследование и создание базы данных (БД) мониторинга рельефа; обработка материалов исследования.

Изучение архивных материалов дистанционного зондирования включало сбор и дешифрирование данных аэрофотосъёмки участка мониторинга. Анализ архивных данных позволил определить пространственное распространение естественных и антропогенных форм рельефа в результате строительства.

Воздушное дистанционное зондирование производилось с применением беспилотного летательного аппарата (БЛА) и высокоточных измерений опорных знаков с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Опорные знаки располагались по периметру участка мониторинга. В дальнейшем они использовались для геопространственного анализа территории.

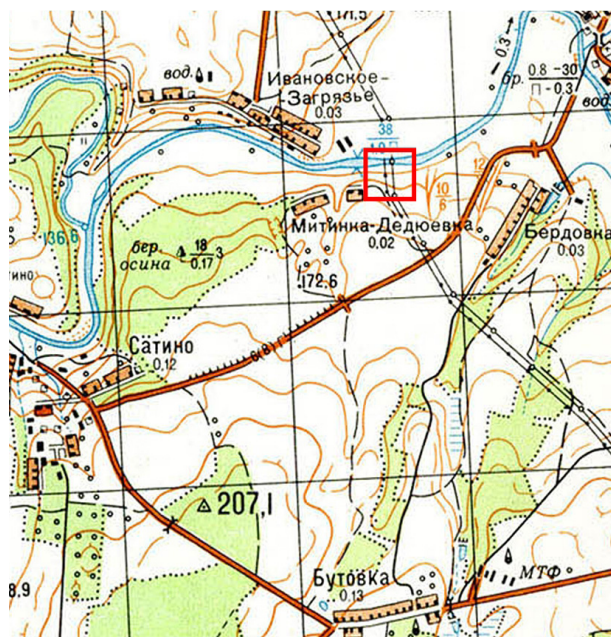


Рисунок 1 – Схема расположения участка мониторинга

Наземное детальное геоморфологическое обследование форм рельефа заключалось в натурном обследовании и изучении форм рельефа: антропогенного склона, эрозионных рытвин, поверхности террасовала, оползневого блока и др. Описание форм рельефа производилось по методике детальной геоморфологической съёмки. Одновременно отмечались выходы на дневную поверхность песчаных и галечных отложений среднеплейстоценового возраста, которые ранее были установлены авторами в геологическом разрезе террасовала.

Создание базы данных (БД) мониторинга рельефа и обработка материалов исследования. БД «мониторинга рельефа участка газопровода» включает блоки архивных сведений, дистанционного зондирования, форм рельефа (естественных и антропогенных) и рельефообразующих процессов. Анализ строения естественных и антропогенных форм рельефа проведен с помощью построения геоморфо-

логических профилей, которые отображают пространственное соотношение естественных (поверхность террасовала) и антропогенных (эрозионные рытвины, оползневой блок, пологий техногенный склон и др.) форм рельефа, а также литологию, генезис и возраст отложений. Анализ распространения естественных и антропогенных форм формирования проводился с помощью составления крупномасштабного плана (1:1000; в 1 см 10 м, сечение горизонталей 0,5 м). Топографическая основа составлена по материалам воздушного дистанционного зондирования. В результате анализа составлены геоморфологическая схема и геоморфологический профиль участка, а также сформировано заключение об условиях формирования, генезисе антропогенных форм рельефа и динамике их дальнейшего развития.

Изучение архивных материалов дистанционного зондирования участка мониторинга. Среди архивных материалов воздушного и космического зондирования, отражающих различные закономерности развития территории, начиная с 1952 г., был выбран ближайший по времени к периоду исследований аэрофотоснимок (АФС) вертолётной съёмки (номинальное разрешение 10-15 см, высота съёмки 700 м), характеризующий состояние участка на осень 2011 г. (рисунок 2). Дешифрирова-

ние АФС позволило установить антропогенные формы рельефа на участке мониторинга, сформированные при прокладке трубопровода в траншею. При земляных работах были изменены естественные формы рельефа, а именно:

- «срезана» прибрежная часть «бечевника» до уреза р. Протва (центральная часть АФС, светло-серый фототон);
- «подрезана» поверхность террасовала и сформирован крутой склон (правая часть снимка, темно-серый фототон АФС);
- сформирован пологий склон вдоль трассы газопровода (центральная и нижняя часть АФС, светло-серый фототон);
- образована насыпная плотина-дамба, перегораживающая приустьевую часть оврага (левая часть АФС, светло-серый тон).

Воздушное дистанционное зондирование с применением БЛА. Съёмка участка мониторинга осуществлялась 8 июня 2017 г. в 15:00 – 16:00 по московскому времени. Непродолжительное время съёмки и облачная погода позволили избежать проблем с изменением условий освещения. Элементы местности не отбрасывали заметных теней, что благоприятно для научной съёмки (Gallagher, 2016: 221). Съёмка выполнена при помощи БЛА «DJI Phantom-2» (Phantom 2, 2017) с высоты 45–50 м стандартной камерой указанного аппарата.

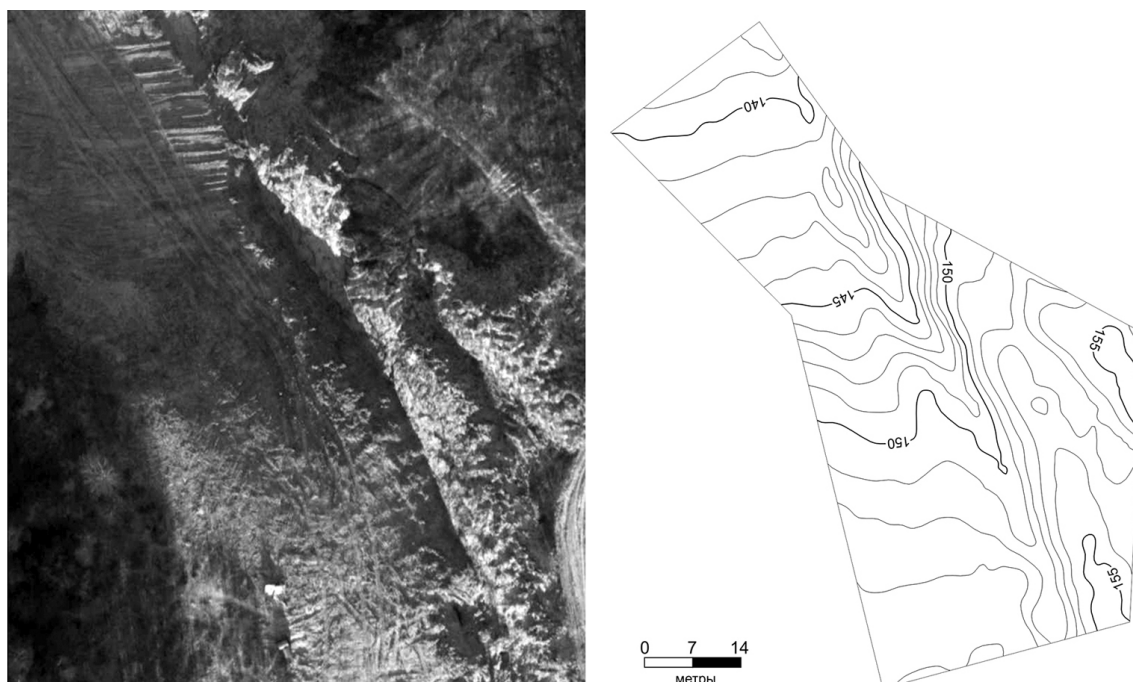


Рисунок 2 – Снимок трассы газопровода (фрагмент) и рельеф участка исследований на стадии строительства, по состоянию на 2011 г.

Фокусное расстояние камеры составляет 5 мм (29 мм в 35-мм эквиваленте), угол обзора – 110°. Оптическая система характеризуется сильной дисторсией, что выражается в искажении получаемых кадров (эффект «рыбьего глаза», рисунок 3).



Рисунок 3 – Снимок участка мониторинга, полученный с БЛА «DJI Phantom-2»

БЛА «DJI Phantom2» сохраняет снимки в формате JPEG с метаданными. В метаданные записываются географические координаты бортового ГНСС-приёмника, определённые в момент съёмки. Координаты отнесены к эллипсоиду WGS-84. Точность записи географических координат составляет 1 угловую секунду, что соответствует приблизительно 3 м на местности. Это недостаточная точность для малой площади съёмки. Вместе с тем, этого вполне достаточно для использования в качестве вспомогательных данных при фотограмметрической обработке. Управление полётом БЛА «DJI Phantom2» осуществляется в ручном режиме с помощью пульта дистанционного управления и мобильного устройства (планшета, смартфона) с операционной системой Android или iOS. Для управления БЛА требуется установка специального приложения. В настоящей работе был использован планшет с системой Android 5.1 и программное обеспечение «Litchi for DJI Phantom2», позволяющее оператору корректировать маршрут полёта и активировать съёмку исследуемого участка цифровой камерой.

Относительным недостатком БЛА «DJI Phantom2» является штатная цифровая камера:

из-за дисторсии (геометрическое искажение/искривление объектов съёмки) только небольшая центральная часть снимка оказывается пригодной для формирования стереопары. Скромные технические характеристики БЛА, возможности прилагаемых приложений и невысокая навигационная точность позиционирования, ограничивают проведение аэрофотосъёмки, включая автоматическую съёмку, но не делают её полностью невозможной.

На участке мониторинга было зафиксировано 47 кадров с двух продольных маршрутов. Для последующей фотограмметрической обработки было отобрано 40 кадров с наименьшими искажениями, продольное перекрытие в пределах одного маршрута составляло порядка 80 %, а поперечное – около 60 %.

Результаты обсуждения

В целях геопространственной фиксации материалов воздушного зондирования и минимизацией искажений цифровых материалов БЛА, с учётом невысокой точности штатной навигационной системы БЛА и отсутствием элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков, по периметру и в центре исследуемого участка были размещены опорные знаки, число которых варьировалось в зависимости от площади исследуемых участков. Для определения плановых координат опорных знаков, которые однозначно дешифрируются на снимках БЛА, использовался высокоточный мобильный комплекс ГНСС «Leica Viva».

В результате уравнивания накоплений мобильного комплекса относительно референцстанции ГНСС «Satino», был сформирован высокоточный файл координат опорных знаков, на основании которого была проведена трансформация мозаики снимков в единое изображение (рисунок 4), т.е. итог преобразования – ортофотоснимок участка, где контурная линия охватывает территорию с наименьшими искажениями.

Составление базы данных (БД) мониторинга рельефа и обработка материалов исследования. В БД включены сведения, полученные при ранее проведенных исследованиях и результаты текущего мониторинга.

Естественные формы рельефа. Трасса газопровода пересекает долину р. Протва выше г. Боровск. Участок мониторинга рельефа занимает отрезок долины вдоль русла длиной около 50 м. При изучении строения рельефа долины р. Протва на данном участке ранее в 1996-2005

г.г. были установлены фрагменты террасоувала и бечевника, сложенные аллювием среднего неоплейстоцена (Воскресенский, 2009:260; Федосеев, 2010:295).



Рисунок 4 – Ортофотоснимок участка мониторинга

Фрагменты бечевника («террасовидная» поверхность, наклоненная в сторону русла) и террасоувала (поверхность, состоящая из «слившихся» в единую наклонную поверхность надпойменные террасы р. Протва) протягиваются вдоль правого борта долины. «Бечевник» и «террасоувал» отделены друг от друга крутым склоном относительной высотой до 12-15 м. (см. рисунки 5 и 6). В уступе бечевника вскрываются аллювиальные галечники. Они представлены хорошо окатанной (до 3-4 класса) галькой известняка и кремня с заполнителем из разнозернистого пылеватого разнозернистого песка, гравия и дресвы. В крутом склоне террасоувала, который поднимается над бечевником, обнажаются аллювиальные светло-серые пески с включением небольшого количества гравия, дресвы. В верхней части геологического разреза аллювиальные пески перекрыты плотными склоновыми дефлюкционными суглинками. Они образуют покров мощностью до 2-3 м на поверхности террасоувала. В долине р. Протва террасоувал и бечевник сформировались в позднем неоплейстоцене-голоцене (Рычагов, 1996: 57).

Наблюдения, проведенные на данном участке долины р. Протва в 2005-2016 гг., показали, что на крутом склоне террасоувала (рисунок 5) протекают процессы оползания, обваливания и осыпания. Оползание представлено телами покровных и склоновых суглинков, скрепленных корневой системой деревьев и кустарников, произрастающих в присклоновой части террасоувала. Мощность блоков оползания достигает 1,5-2,0. По мере движения блока от бровки террасоувала к подножию крутого склона происходит разрушение минеральной части блока под воздействием жидких осадков и таянии снежного покрова. В отдельные годы у подножья крутого склона и в пришовной части бечевника скапливаются обломки стволов деревьев, кустарников и их корневых систем. С поверхности бечевника оползневые накопления выносились при подъеме уровня р. Протва в половодья и паводки. Осыпные участки на поверхности крутого склона фиксировались периодически при визуальных осмотрах. Осыпание аллювиальных песков приурочено, как правило, к участкам площадью в несколько квадратных метров между оползающими блоками, а также к участкам свободным от травянистой растительности. К этим же участкам приурочены эрозионные борозды. Обваливание блоков склоновых суглинков происходит в результате образования «карнизов» в верхней части крутого склона. Формирование обвальных блоков связано с образованием ниш и «карманов» при осыпании, дефляции и размыве аллювиальных песков в верхней части крутого склона.

Таким образом, в пределах естественного крутого склона террасоувала господствует парагенез склоновых процессов: обваливание, осыпание, оползание, который сопровождается локальным проявлением дефляции, бороздового (делювиального) смыва. Ведущую роль играет обваливание блоков суглинков, скрепленных корневой системой деревьев и кустарников, с последующим их оползанием по поверхности склона, сложенного аллювиальными песками.

Антропогенные формы рельефа. Визуальные наблюдения за рельефом участка трассы газопровода проводились в течение последних нескольких лет после строительства трубопровода. В период до 2011 г. на данном участке трассы газопровода был сформирован техногенный склон с большим уклоном по сравнению с современным техногенным склоном. В его пределах в результате сформировалась эрозионная рытвина, которая достигала в средней части склона относительной глубины в 1,5-2,0 м при ширине до 2,0-2,5 м.

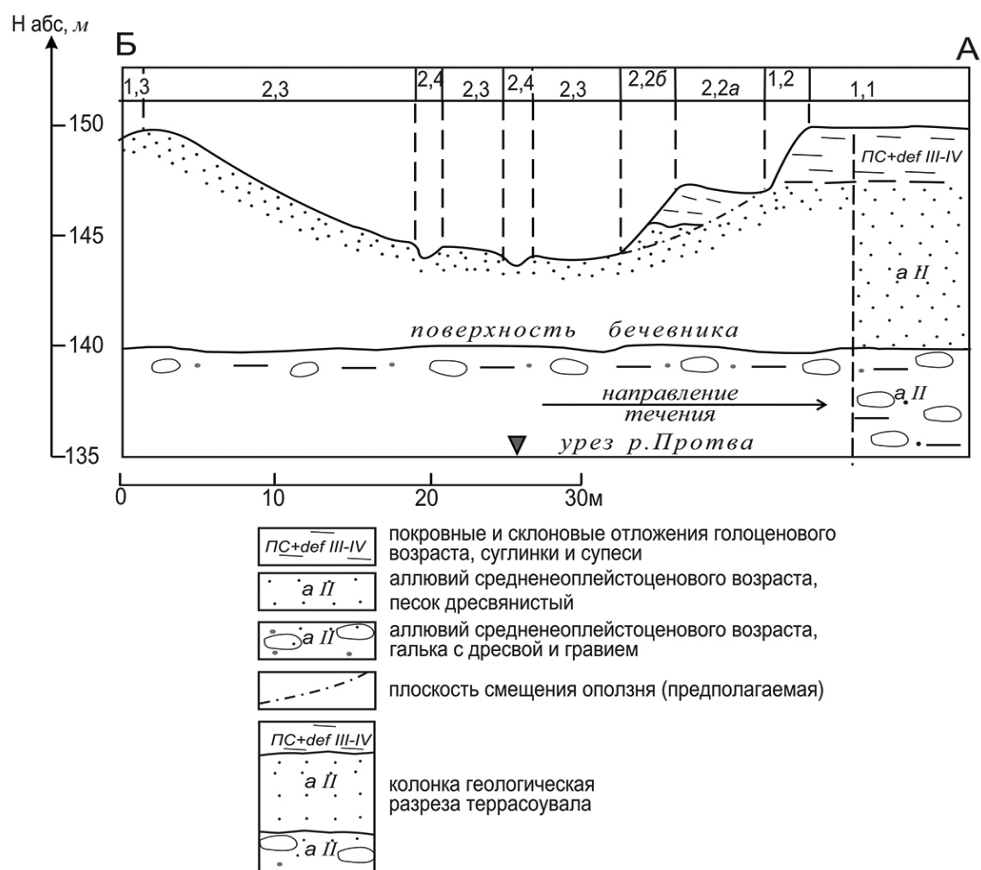


Рисунок 5 – Профиль по линии Б-А

Сформировавшийся к 2011 г антропогенный рельеф: склон и рытвина – были преобразованы в результате рекультивации после прокладки трубопровода в 2011 г. (см. раздел «Изучение архивных материалов...»). В результате мониторинга рельефа в 2017 г. были выявлены изменения в морфологии антропогенной поверхности крутого и полого склонов. В пределах техногенных крутого склонов образовалась узкая террасовидная площадка шириной до 2-4 м с обратным уклоном в сторону вышерасположенного склона. Ее поверхность опущена на 2-3 м относительно приривочной части террасовала. Внешняя бровка террасовидной площадки над пологим техногенным склоном возвышается на 5-6 м. В пришовной части она имеет неглубокий ров-ложбину глубиной до 0,5 м. В уступе террасовидной площадки обнажаются аллювиальные пески, перекрытые склоновыми суглинками, аналогичные тем, что установлены в геологическом разрезе террасовала (рисунок 5). Морфология террасовидной площадки и строение рыхлых отложений в ее

пределах позволяют полагать, что данный участок склона может быть отнесен к «склонам отседания» (Воскресенский, 1971:189). (В данном случае роль «прочных пород» выполняют плотные склоновые суглинки, а «подстилающих деформируемых отложений» – аллювиальные пески). Строение склона отседания позволяет полагать, что причиной отседания является превышение внутреннего сцепления в песчаной толще при увеличении веса верхнего слоя суглинков в результате их насыщения дождевой и талой водой.

Таким образом, крутой техногенный склон подвержен процессу отседания, в отличие от естественного склона, для которого характерно формирование блоков оползней-сплывов.

В пределах полого техногенного склона в результате мониторинга 2017 г. установлена сеть эрозионных рытвин (рисунок 3.). Она сформирована в результате рельефообразующей деятельности временных водотоков, формирующихся на склоне при выпадении дождевых осадков и таянии снежного покрова.



Рисунок 6 – Геоморфологическая схема участка мониторинга

Общая длина техногенного пологого склона, сложенного неуплотненными техногенными песками, в пределах которого она сформирована, достигает не менее 50 м. Сеть рытвин имеет в плане древовидную форму. Рытвины достигают максимальной глубины до 1,5 м и ширины до 1,0 м. В средней части техногенного склона образовались участки площадью до 10 кв. м, где эрозийные «борозды» чередуются с межбороздовыми «гребнями». Формирование рытвин на относительно пологом склоне обусловлено низкой противозерозионной устойчивостью песчаных техногенных грунтов. В нижней части склона и прилегающей части бечевника эрозийная рытвина переходит в конус выноса временного водотока – веерообразной в плане поверхности. Мощность накопленных песчаных отложений не превышает 20-50 см. Незначительные плановые размеры конуса выноса и мощность отражают относительно невысокую интенсивность эрозии и аккумуляции временного водотока (рисунки 4, 5, 6).

Таким образом, в пределах техногенного склона трассы газопровода за период после строительства в 2011-2017 г.г. сформировались блок отседания и сеть эрозийных рытвин. Их происхождение связано парагенезом склоновых (отседание) и эрозийных процессов. Благоприятными условиями для образования в течение

6-ти лет антропогенных форм рельефа служат:

- сочетание фрагментов крутого и относительно пологого техногенных склонов при незначительных относительных превышениях в их пределах от 2-5 м до 15 м;
- искусственные самоуплотнившиеся песчаные грунты с низкой категорией размываемости в пределах пологого техногенного склона (Овражная эрозия, 1989:33);
- разреженный травянистый покров;
- небольшая (до первых сотен квадратных метров) площадь водосбора эрозийной рытвины.

Эти условия позволяют отнести данный участок к территориям «с первичными признаками процесса оврагообразования» (Зорина, 2003:153). Подобные территории требуют мониторинга, чтобы установить наступление предкризисного состояния. При этом необходимо учитывать, что долина р. Протвы относится к территориям с высокой «70 % степенью реализации потенциала оврагообразования» (Зорина, 2003:148).

Выводы

1. Разработана методика мониторинга рельефа трассы магистрального трубопровода в центре Русской Равнины с применением дис-

танционных и геоинформационных методов включающая: изучение архивных материалов дистанционного зондирования; воздушное дистанционное зондирование; наземное детальное геоморфологическое обследование и составление базы данных (БД) мониторинга рельефа; обработку материалов исследования.

2. В результате мониторинга рельефа в 2017 г. были выявлены изменения в морфологии техногенной пологонаклонной поверхности, сформированной при рекультивации трассы га-

зопровода: в пределах относительно крутой части сформировалась террасовидная площадка – ступень «блока отседания», а на пологой части – сеть эрозионных рытвин, заканчивающаяся веерообразным конусом выноса.

3. Участок газопровода относится к территории «с первичными признаками оврагообразования», что требует: а) оценки условий и факторов оврагообразования; б) мониторинга эрозионных рытвин в целях установления их «предкризисного состояния».

Литература

- Carbonneau, P.E. and Dietrich, J.T., 2017. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (3), 473–486.
- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzolf, I., Peter, K.D., and Ries, J.B., 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4 (11), 3390–3416.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L. Carbonneau, P.E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(4): 421-430
- 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. 217-232. (2016).
- James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., and Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51–66.
- Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., and Schmidt, J., 2014. Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. *Remote Sensing*, 6 (8), 7050–7080.
- Lucieer, A., Jong, S.M. De, and Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38 (1), 97–116.
- Mohitpour Mo, Golshan H., Murray A. *Pipeline Design & Construction: A Practical Approach*. 2nd edition. New York: ASME Press, 2003. p.656
- Niethammer, U., Rothmund, S., James, M.R., Travelletti, J., and Joswig, M., 2010. UAV-based remote sensing of landslides. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (Part 5), 496–501.
- Phantom 2. Characteristics. [Electronic resource]: URL: <https://www.dji.com/ru/phantom-2> (accessed 21.07.2017).
- Rock, G., Ries, J.B., and Udelhoven, T., 2012. Sensitivity Analysis of Uav-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22 (September 2016), 69–73.
- Smith M, Chandler J, Rose J. 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 161- 255. DOI:10.1002/esp.1702.
- Smith, M.W. and Vericat, D., 2015. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40 (12), 1656–1671.
- Tonkin, T.N., Midgley, N.G., Graham, D.J., and Labadz, J.C., 2014. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology*, 226, 35–43.
- Turner, D., Lucieer, A., and de Jong, S., 2015. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7 (2), 1736–1757.
- Ullman, S., 1979. The Interpretation of Structure from Motion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 203 (1153), 405–426.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., and Reynolds, J.M., (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Баборыкин М.Ю. Мониторинг опасных геологических процессов на линейных объектах // Инженерные изыскания, №10-11. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2013. – С. 44-55.
- Волков А.В. Устойчивость рельефа в обстановке техногенного воздействия (на примере газотранспортного строительства) // Вестник Поморского университета, серия Естественные науки. – 2009. – №3. – С. 18-22.
- Воскресенский И.С. Новые данные о палеогеоморфологических условиях формирования россыпей в бассейне Верхней Оки // Материалы 7-ой Всероссийской конференции Вузовская наука региону. – Вологда: ВоГТУ, 2009. – С. 259-261.
- Воскресенский С.С. Динамическая геоморфология. Формирование склонов. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 230 с.

Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 343 с.

Глазунов В.В., Бурлуцкий С.Б. Оценка устойчивости оползневых склонов по трассе проектируемого газопровода «Южный поток» по данным томографических технологий инженерной геофизики // Инженерные изыскания, № 2. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2014. – С. 30-36

Единая система газоснабжения России // Официальный сайт ОАО «Газпром». URL:<http://www.gazprom.ru/about/production/transportaion/> (дата обращения: 21.02.2016).

Ермолов А.А. Исследование опасных экзогенных геологических процессов в рамках комплексных инженерных изысканий и производственного мониторинга на линейных объектах // Инженерные изыскания, № 12. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2014. – С. 39-40

Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. – М.: ГЕОС, 2003. – 170 с.

References

Baborykin M.Yu. (2013) Monitoring opasnyh geologicheskikh processov na linejnyh objektah [Natural hazards monitoring on linear construction]. *Inzhenernye izyskaniya*, no. 10-11, pp. 44-55.

Carbonneau, P.E. and Dietrich, J.T., 2017. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (3), 473–486.

D'Oleire-Oltmanns, S., Marzolf, I., Peter, K.D., and Ries, J.B., 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4 (11), 3390–3416.

Edinaya sistema gazosnabzheniya Rossii // Oficial'nyj sajt ОАО «Газпром» [The assessment of landslide slopes sustainability along projected South Stream pipeline estimated by tomographic techniques of engineering geophysics URL:<http://www.gazprom.ru/about/production/transportaion/> (accessed 21.02.2016).

Ermolov A.A. (2014) Issledovanie opasnyh ekzogenykh geologicheskikh processov v ramkah kompleksnykh inzhenernykh izyskanij i proizvodstvennogo monitoringa na linejnyh objektah [The assessment of natural exogenous geological processes within the scope of complex engineering survey and monitoring on linear constructions]// *Inzhenernye izyskaniya*, no. 12, pp. 39-40

Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L. Carbonneau, P.E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(4): 421-430

Fedoseev I.I. (2010) Rel'ef i rossypeprojavlenija zolota bassejna Verhnej Oki [Relief and gold placer manifestation in the upper Oka basin] *Natural and Technical sciences*. 46 (2), pp. 293-296 .

Formirovanie opolznej, selej i lavin. Inzhenernaya zashchita territorij [The formation of landslides, debris flows and avalanches] (1987) / G.S. Zolotarev, S.S. Grigoryan, S.M. Myagkov (eds.) Moscow: MSU, 180 p.

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.

Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей [Geomorphological zoning of the USSR and contiguous seas] (1980). Moscow: MSU, 343 p.

Glazunov V.V., Burluckij S.B. (2014) Ocenka ustojchivosti opolznevyykh sklonov po trasse proektiruemogo gazoprovoda «Yuzhnyj potok» po dannym tomograficheskikh tekhnologij inzhenernoj геофизики [The assessment of landslide slopes sustainability along projected South Stream pipeline estimated by tomographic techniques of engineering geophysics]. *Inzhenernye izyskaniya*, no. 2, pp. 30-36

James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., and Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51–66.

Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., and Schmidt, J., 2014. Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. *Remote Sensing*, 6 (8), 7050–7080.

Korolev V.A. (2007) Monitoring geologicheskikh, litotekhnicheskikh i ekologo-geologicheskikh sistem [The assessment of natural exogenous geological processes within the scope of complex engineering survey and monitoring on linear constructions]. Moscow: KDU, 416 p.

Kruzhalin V.I. (2001) Ekologicheskaya geomorfologiya sushi [The assessment of natural exogenous geological processes within the scope of complex engineering survey and monitoring on linear constructions]. Moscow: Nauchnyj mir, 176 p.

Lucieer, A., Jong, S.M. De, and Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38 (1), 97–116.

Mazur I.I., Ivantsov O.M. (2004) Bezopasnost' truboprovodnykh system [The assessment of natural exogenous geological processes within the scope of complex engineering survey and monitoring on linear constructions]. Moscow: ITs Elima, 1104 p.

Mohitpour Mo, Golshan H., Murray A. Pipeline Design & Construction: A Practical Approach. 2nd edition. New York: ASME Press, 2003. p.656

Niethammer, U., Rothmund, S., James, M.R., Travelletti, J., and Joswig, M., 2010. UAV-based remote sensing of landslides. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (Part 5), 496–501.

Ovrazhnaja erozija. / Pod redaktsiej R.S. Chalova. (1989). [Ravine erosion / R.S. Chalov (ed.)]. Moscow: MSU, 168 p.

Phantom 2. Characteristics. [Electronic resource]: URL: <https://www.dji.com/ru/phantom-2> (accessed 21.07.2017).

Rock, G., Ries, J.B., and Udelhoven, T., 2012. Sensitivity Analysis of Uav-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/ C22 (September 2016), 69–73.

- Phantom 2. Characteristics. [Electronic resource]: URL: <https://www.dji.com/ru/phantom-2> (accessed 21.07.2017).
- Rock, G., Ries, J.B., and Udelhoven, T., 2012. Sensitivity Analysis of Uav-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/C22 (September 2016), 69–73.
- Smith M, Chandler J, Rose J. 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 161- 255. DOI:10.1002/esp.1702.
- Smith, M.W. and Vericat, D., 2015. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40 (12), 1656–1671.
- Stroenie i razvitie doliny r. Protvy. /Pod red. G.I. Rychagova i S.I. Antonova. (1996) [Structure and development of river Protva valley]. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 129 p.
- Sharapov S.V (2010). Morfologicheskij analiz rel'efa pri ekologicheskikh izyskaniyah na objektah podzemnogo hraneniya gaza [Morphological relief analysis in the framework of ecological survey at the objects of underground gas storage]. *MSU Vestnik, series 5. Geography*, no. 1, pp. 28-33.
- Tonkin, T.N., Midgley, N.G., Graham, D.J., and Labadz, J.C., 2014. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology*, 226, 35–43.
- Turner, D., Lucieer, A., and de Jong, S., 2015. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7 (2), 1736–1757.
- Ullman, S., 1979. The Interpretation of Structure from Motion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 203 (1153), 405–426.
- Volkov A.V. (2009) Ustojchivost' rel'efa v obstanovke tekhnogenogo vozdejstviya (na primere gazotransportnogo stroitel'stva) [The relief sustainability under technogenic impact]. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University, serija Estestvennye nauki*, no. 3. pp. 18-22.
- Voskresensky I.S. (2009) Novye dannye o paleogeomorfologicheskikh usloviyah formirovaniya rossypej v bassejne Verhnej Oki [New data on palaeo-geomorphological conditions of placer forming in the upper Oka basin]. *Materials of 7th all-Russia conference: "High School Science for Regions"*. Vologda State Technical University (Russia), pp. 259-261.
- Voskresensky S.S. (1971) Dinamicheskaja geomorfologija. Formirovanie sklonov [Dynamic geomorphology. Slope formation]. Moscow: MSU, 230 p.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., and Reynolds, J.M., (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Zorina E.F. (2003) Ovrazhnaja jerozija: zakonomernosti i potencial razvitija. [Ravine erosion: patterns and development potential]. Moscow: GEOS, 170 p.