



Обеспечение безопасности перевозок с помощью средств дистанционного зондирования



Сергей ИВАШОВ
Sergey I. IVASHOV

Александр БУГАЕВ
Alexander S. BUGAEV



Александр ТАТАРАИДЗЕ
Alexander B. TATARAI DZE

Алексей СКРЕБКОВ
Alexey V. SKREBKOV



Enhancement of Transportation Safety by Remote Sensing Devices

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 188)

Повышение безопасности железнодорожных перевозок в условиях растущих скоростей и интенсивности движения составов и при наличии террористической угрозы требует внедрения новых технических средств наблюдения и контроля. Особую задачу представляет разработка мер предотвращения аварий и катастроф, а также ликвидации их последствий. Применение средств дистанционного зондирования Земли, позволяющих оперативно получать информацию с больших площадей и с высоким разрешением, может оказать существенную помощь в этой сфере. В статье рассматриваются варианты спутников и дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов, получающих информацию в различных диапазонах электромагнитного спектра. Анализируются их достоинства и недостатки, возможности совместного использования.

Ключевые слова: безопасность, железнодорожные перевозки, дистанционное зондирование Земли, спутники, дистанционно-пилотируемые летательные аппараты, аэрофотосъёмка, радиолокационное зондирование, обработка изображений.

Ивашов Сергей Иванович – кандидат технических наук, начальник лаборатории дистанционного зондирования МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Бугаев Александр Степанович – академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой МФТИ (ГУ), Москва, Россия.

Татараидзе Александр Бидзинович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории дистанционного зондирования МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Скребков Алексей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропоездов и локомотивов РУТ (МИИТ), Москва, Россия.

В научных публикациях последних лет [1–7] достаточно детально показаны возможные области применения дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) и других средств дистанционного зондирования, включая спутники землеобзора, для обеспечения безопасности железнодорожных перевозок.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является методом получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с самим объектом, например, воздушных или космических носителей. Такая информация может быть получена в различных диапазонах электромагнитных волн, но



а)



б)

Рис. 1. Общий вид ДПЛА вертолётного типа: а) в полёте с фотокамерой, установленной в карданном подвесе; б) оператор с пультом управления.

могут регистрироваться и другие виды излучения и параметры: радиационные, гравитационные, измерения рельефа местности и т.п. Методы зондирования делятся на пассивные (используются естественное отражённое или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью) и активные (используют вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия, например, радиолокатором или лазером). В зависимости от решаемой задачи следует применять тот или иной тип носителя аппаратуры и её состав.

Статья посвящена исследованию возможности комбинированного использования различных источников информации.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ДПЛА

Если раньше ДПЛА использовались исключительно в военных целях, то в настоящее время именно их гражданское применение становится все более актуальным. Первоначальный интерес военных, возникший в конце 1960-х годов, диктовался стремлением избежать риска жизни для экипажей при выполнении разведывательных полётов, а также при нанесении ударов по разведанным целям. Недостатком тех летательных аппаратов была необходимость возвращения на свою территорию после выполнения полётного задания для проявления отснятой фотоплёнки и дешифровки полученного

материала. Это снижало оперативность получения информации.

В дальнейшем наиболее успешно разработка ДПЛА развивалась в Израиле (тактические и оперативно-тактические аппараты) и США (оперативно-тактические и стратегические ДПЛА). Прогресс в разработке нового их поколения связан в первую очередь с появлением цифровых устройств, включая фотоаппараты, работающие в различных диапазонах длин волн, спутниковых средств навигации и спутниковых средств связи. Это значительно улучшило характеристики бортовой аппаратуры, прежде всего массогабаритные, и позволило улучшить лётные качества ДПЛА.

Для современных ДПЛА гражданского назначения характерны более низкая стоимость эксплуатации и отсутствие необходимости использования стационарных аэродромов (как правило, их запуск осуществляется с передвижных катапульт или прямо с руки оператора). Особый прогресс был достигнут в разработке много-роторных аппаратов вертолётного типа с электрической тягой. Они отличаются простотой конструкции и дешевизной. Это объясняется отсутствием такого неотъемлемого для обычных вертолётов конструктивного элемента, как автомат перекоса лопастей, и использованием асинхронного управления тягой электрических двигателей, позволяющего контролировать перемещение аппарата в полёте. Шестироторный ДПЛА, изображённый на рис. 1, был использован для получения изображений инфраструктуры экспери-



ментального кольца ВНИИЖТ в Щербинке. Ещё одним достоинством данного типа ДПЛА является то обстоятельство, что их применение в полосе отчуждения железной дороги и на высотах менее 100 м не требует специальных разрешений на полёты.

Недостатком многороторных ДПЛА считается относительно небольшое время полёта (как правило, менее 1 часа) и, следовательно, связанные с этим ограничения по дальности и высоте полёта. Однако сам тип летательных аппаратов крайне удобен, когда оператор, управляющий их полётом, находится непосредственно на месте события или недалеко от него. В этом случае информацию о происходящем на земле можно получать в реальном масштабе времени, что необходимо, например, при ликвидации последствий железнодорожной катастрофы. Увеличение времени полёта может быть достигнуто за счёт сменных аккумуляторов во время промежуточных посадок, хотя ограничение по радиусу действия остаётся, и оно существенно.

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ РЕСУРСОВ

Если в 60-е и 70-е годы прошлого века основными потребителями спутниковой информации (фото- и радиолокационной разведки) были военные, а сама информация носила секретный характер, то в последние десятилетия значительный сегмент потребителей составляет весьма прибыльный гражданский сектор. В первую очередь к задачам, решаемым спутниками землеобзора, можно отнести:

- исследование природных ресурсов и рациональное природопользование;
- предсказание, анализ протекания, контроль за возникновением чрезвычайных ситуаций и ликвидация их последствий;
- геологоразведка;
- прогноз погоды;
- контроль за окружающей средой и источниками её загрязнения;
- сельское хозяйство;
- лесное хозяйство;
- строительство и ещё многие другие отрасли.

При дистанционном зондировании со спутников производится регистрация из-

лучения поверхности Земли в различных диапазонах электромагнитных волн. Как правило, используются многоспектральная фотосъёмка и радиолокаторы бокового обзора. В некоторых случаях при геодезической съёмке для измерения рельефа поверхности применяется излучение лазера. Данные ДЗЗ, полученные с космического аппарата, оснащённого фотоаппаратурой видимого диапазона, характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы и времени суток. Поэтому для снятия этих ограничений получили развитие спутники ДЗЗ, оснащённые радиолокаторами бокового обзора. Радиолокационные снимки имеют худшее разрешение по сравнению с оптическими, но дают возможность получать изображения независимо от погоды и времени суток, что имеет принципиальное значение, например, для проводки судов по Севморпути в период полярной ночи.

В настоящее время спутники ДЗЗ составляют наряду со спутниками связи и навигации значительный сегмент коммерческих услуг космической индустрии. Часто спутники ДЗЗ создаются организациями, связанными с военно-промышленным комплексом своих стран, что позволяет снизить затраты на их разработку за счёт преимущества конструктивных решений со спутниками военного назначения.

Обычно спутники ДЗЗ запускаются на так называемую солнечно-синхронную орбиту (иногда именуемую гелиосинхронной), которая обладает такими параметрами, что спутник, находящийся на ней, проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Таким образом, угол освещения земной поверхности будет приблизительно одинаковым на всех проходах спутника. Постоянные условия освещения очень хорошо подходят для спутников, получающих оптические изображения земной поверхности (в том числе спутников дистанционного зондирования земли, метеоспутников). Параметры солнечно-синхронных орбит лежат в пределах: высота над поверхностью земли 600–800 км, период обращения 96–100 мин, а наклон орбиты около 98°.

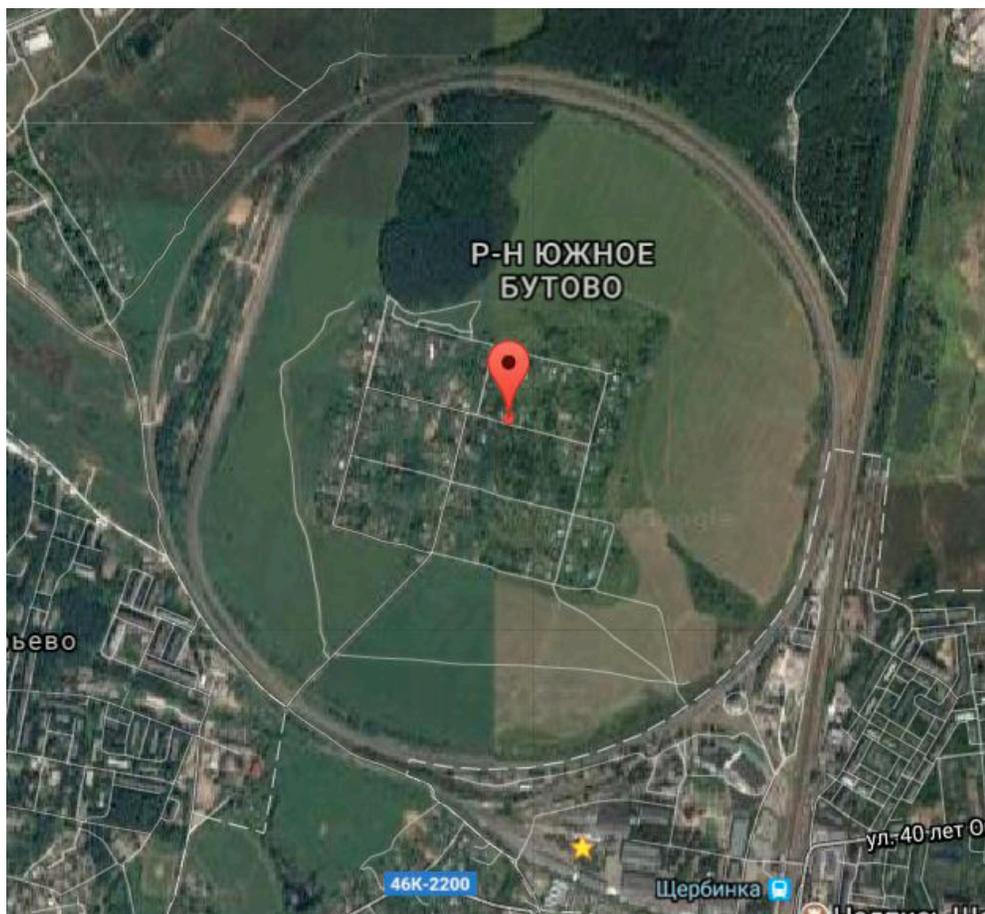


Рис. 2. Изображение ЭК ВНИИЖТ из базы данных Google Maps.

Основным достоинством оптических спутников ДЗЗ является возможность получения снимков с высоким разрешением, которое может достигать 0,3 м.

В то же время эти спутники не всепогодные, т.е. не могут получать изображение ночью или на местности, закрытой облачностью. Если первый недостаток ещё может быть потенциально устранён, например, при использовании инфракрасной оптики, то облачность, которая в средних широтах зимой может скрывать землю неделями, а порой и месяцами, делает невозможным использование оптических спутников.

Всепогодными являются спутники радиолокационной разведки местности, хотя они и обладают худшим разрешением. При этом радиолокация даёт дополнительные возможности, например, получение изображений в различных поляризациях.

БАЗЫ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Результаты спутниковой фотосъёмки получили широкое распространение благодаря общедоступности и простоте работы с ними, например, посредством Интернета. Спутниковые снимки и карты на их основе используются даже для решения бытовых задач, в том числе для навигации личных автомобилей или вызова такси.

Бесплатные сервисы космической информации хотя и обладают достаточно высоким разрешением, но не позволяют получать оперативную информацию, она обновляется там довольно редко. Фотоизображения для сайтов обычно получают по результатам съёмки в тёплое время года, при отсутствии снежного покрова. Такие изображения могут быть использованы для некоторых видов аналитической работы, но не дают актуальную информацию об интересующем событии или объ-



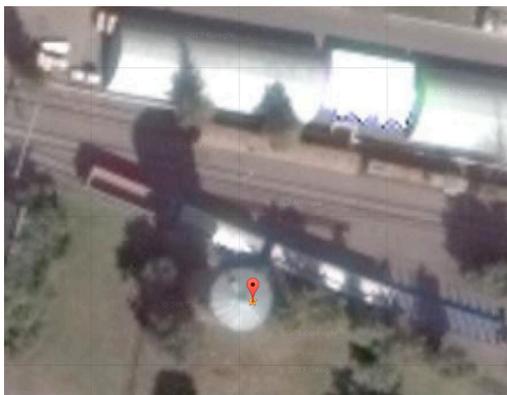


Рис. 3. Крупномасштабное спутниковое изображение района водонапорной башни на ЭК.

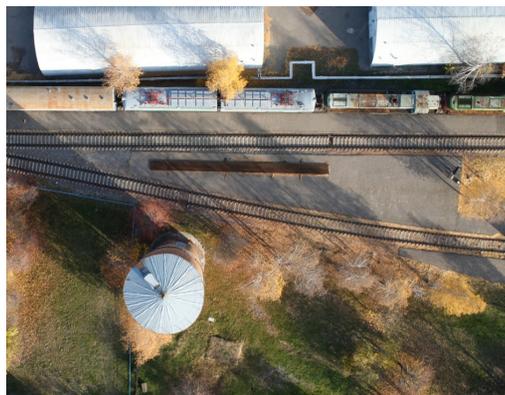


Рис. 4. Фотоснимок района водонапорной башни на ЭК, полученный с борта ДПЛА.

екте. Для этого надо обращаться в специализированные организации, торгующие спутниковой информацией. Эта услуга является платной, но зато позволяет иметь данные с учётом пожеланий заказчика: времени, места и условий съёмки, качество снимков и других параметров. Информация может быть как актуальной, т.е. полученной недавно, так и взятой из баз данных, накопленных за предыдущие годы. Последнее является важным для информации, используемой в экологических исследованиях, где предстоит сравнить изменение ландшафта за длительный срок.

СРАВНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ С РАЗЛИЧНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

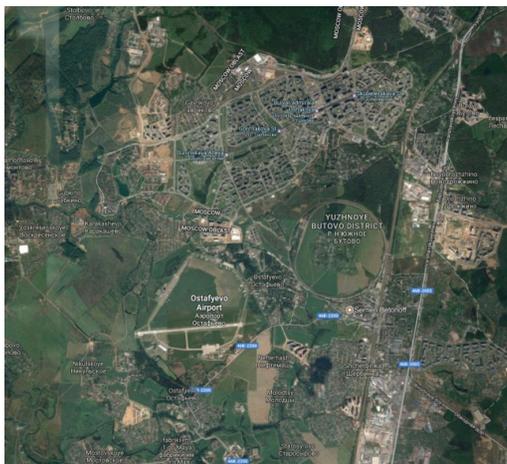
Для выполнения работ по получению изображений транспортной инфраструктуры железных дорог было выбрано экспериментальное кольцо (ЭК) ВНИИЖТ. Выбор этого объекта был связан со следующими обстоятельствами. Во-первых, он хорошо изучен и расположен близко от Москвы. Во-вторых, в силу его экспериментального статуса не возникло затруднений с разрешением на полёты ДПЛА над его территорией. На рис. 2 приведено изображение ЭК, взятое из базы данных GoogleMaps. Центр кольца отмечен маркером, его координаты: 55.521373, 37.550190 (северная широта и восточная долгота в градусах соответственно). Внутри кольца расположен дачный посёлок. Само ЭК состоит из двух двухпутных колец: внешнего и внутреннего. Внешнее имеет форму правильной окружности,

а внутреннее содержит прямолинейный участок.

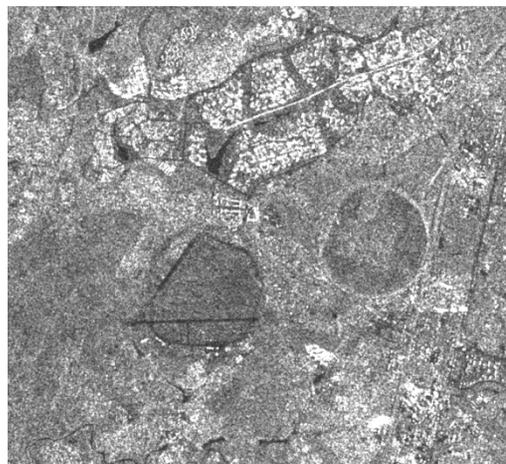
В нижнем левом углу находится депо. Квадратом отмечен один из районов полётов ДПЛА, результаты которых используются в нашей статье. Звёздочка в квадрате находится на месте расположения водонапорной башни, служившей ориентиром при полётах. Увеличенное изображение башни, полученное со спутника, приведено на рис. 3.

Крыша башни имеет коническую форму и покрыта оцинкованным железом. Отдельные листы железа стыкуются между собой в виде вертикальных рёбер. Ребристая форма крыши хорошо просматривается даже на спутниковом снимке. Этот же район около водонапорной башни был снят с борта ДПЛА, оснащённого фотоаппаратом в карданном подвесе с высоты около 70 м. Результат съёмки на рис. 4.

Оба снимка отличаются расположением подвижного состава на путях, поскольку сделаны в различное время года. Также они отличаются как размерами, так и направлением тени, отбрасываемой местными предметами, ибо снимки были произведены при разном положении солнца на небесной сфере. Это обстоятельство подчёркивает важность солнечно-синхронных орбит, которые упомянуты ранее и обычно предназначены для спутников ДЗЗ. Ещё одним преимуществом солнечно-синхронных орбит является возможность по длине отбрасываемой тени на снимках, полученных на разных витках обращения спутника, определить, строится объект или нет и с какой скоростью. Обычно этот метод используется



а)



б)

Рис. 5. Спутниковые снимки окрестностей экспериментального кольца:
а) изображение видимого спектра по данным ресурса Google Maps;
б) радиолокационное изображение с европейского спутника Sentinel-1.

при дешифровке снимков разведывательных спутников, но может быть применён и при кадастровой съёмке, когда необходимо на большом массиве изображений выделить незаконно возводимые постройки. Здесь достаточно вычлесть два изображения, полученных с разницей в несколько недель или месяцев, чтобы зафиксировать вновь возводимые постройки и их высоту.

Если сравнивать разрешающую способность обоих фотоснимков, то очевидно, что изображения с ДПЛА имеют значительно лучшее разрешение, чем спутниковые. Это и понятно, ибо высота орбит спутников ДЗЗ составляет 400–600 км. ДПЛА имеют ещё одно преимущество перед спутниками: они меньше зависят от погодных условий. При наличии облачности невозможно производить съёмку в видимом спектре со спутников. В то время как ДПЛА могут летать ниже границы облачности и получать нужную информацию.

Всепогодной является радиолокационная съёмка. На рис. 5 приведены два крупномасштабных снимка окрестности экспериментального кольца, полученных по данным ресурса Google Maps и базы данных радиолокационного спутника Sentinel-1 [8].

В нижней части обоих снимков видны аэропорт Остафьево (слева на снимке) и ЭК ВНИИЖТ (справа). Оба изображения имеют приблизительно один и тот же масштаб, но видимое изображение содержит больше деталей по сравнению с радиоло-

кационным. Масштаб приведённых снимков можно легко оценить, учитывая, что внешнее кольцо полигона имеет форму правильной окружности диаметром 1912 м.

Преимуществом радиолокации, как указывалось, является всепогодность и круглосуточность. В некоторых случаях радиолокационные снимки могут оказаться единственным источником информации. В связи с этим можно сделать вывод, что для решения своих задач ОАО «РЖД» важно иметь доступ к разнообразным средствам ДЗЗ.

ПОСТРОЕНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Современные средства обработки изображений помогают на основе отдельных снимков, полученных с ДПЛА, синтезировать трёхмерные изображения объектов на поверхности Земли. Это позволяет рассматривать объекты под различными ракурсами и с различных высот. Такая технология может найти применение при проектировании сложных объектов инфраструктуры (мостов, тоннелей и т.д.), а также решать некоторые задачи обеспечения их безопасности.

В качестве исходных данных для построения трёхмерной модели поверхности участка земли с расположенными на нём объектами железнодорожной инфраструктуры были использованы 176 фотографий, собранных в ходе полётов ДПЛА верто-



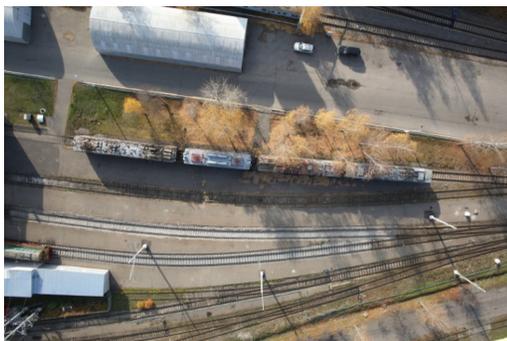


Рис. 6. Примеры исходных изображений, сделанных ДПЛА.

лётного типа с шестью подъёмными роторами и расположенной на нём в управляемом карданном подвесе камерой Canon EOS 5D Mark II с объективом Canon EF-S 17–55 f/2.8 IS USM, рис. 1. Примеры некоторых исходных фотографий приведены на рис. 6.

Для синтеза трёхмерного изображения решается задача поиска соответствия между ключевыми точками на разных изображениях, выполняется она путём поиска точек с минимально отличающимися дескрипторами — векторами параметров, описывающих точку. Так, алгоритм SIFT описывает каждую ключевую точку вектором со 128 параметрами, определяемыми на основе локальных градиентов в окрестностях точки.

Один из наиболее эффективных алгоритмов фильтрации ложно определённых соответствий ключевых точек — RANSAC (Random Sample Consensus) [9]. Суть метода заключается в итеративном поиске лучшей матрицы преобразования (фундаментальной матрицы) между случайно выбранными N ключевыми точками на одном изображении и соответствующими точками на втором. В итоге из набора ключевых точек удаляются такие, отклонение которых в результате применения найденного преобразования от соответствующих точек на другом изображении превышает заданный порог.

Для построения трёхмерной модели поверхности необходимо установить внутренние (фокусное расстояние, координаты принципиальной точки, коэффициенты дисторсии) и внешние параметры камеры (положение и ориентация). Внутренние параметры являются независимыми от

внешних условий и не меняются от снимка к снимку. Как правило, внутренние параметры вычисляются с помощью съёмки калибровочных объектов, геометрия которых заранее известна, но могут быть также вычислены и без их использования при условии наличия большого количества снимков с общими точками [10]. Внешняя калибровка производится посредством триангуляции ключевых точек, общих для двух и более кадров.

Полученная трёхмерная модель поверхности под различными ракурсами наблюдения и с различных высот показана на рис. 7.

Более полное представление о полученной модели может быть получено из видео, представленного в [11]. Следует отметить некоторые особенности данных, на которых была построена модель:

- сравнительно небольшое количество снимков;
- неоптимальная траектория полёта ДПЛА;
- малое перекрытие между снимками;
- отсутствие сведений об ориентации ДПЛА и камеры, а также данных о GPS/ГЛОНАСС координатах.

Несмотря на указанные особенности, полученная модель достаточно точно отображает характер местности, где производилась съёмка. Построение модели осуществлялось при помощи математического обеспечения Pix4DMapper [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ возможностей использования дистанционных средств зондирования Земли (спутники ДЗЗ и ДПЛА, оснащённые различными датчика-

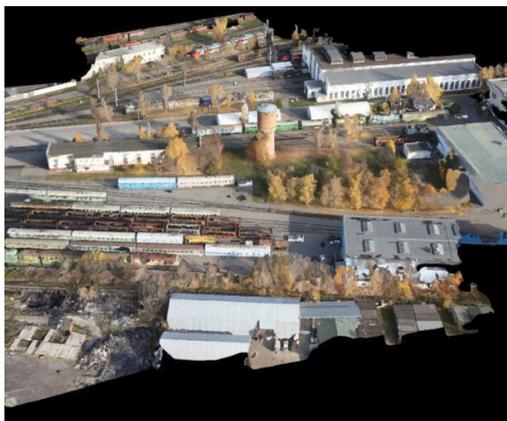


Рис. 7. Трёхмерная модель поверхности.

ми) подтверждает, что они могут оказаться эффективными для обеспечения безопасности движения на железных дорогах России. Их информация может найти применение и для решения других задач, например, при проектировании и строительстве железнодорожной инфраструктуры. В статье показано, что эффективность средств дистанционного зондирования Земли повышается за счёт комбинирования спутниковых информационных систем и ДПЛА, а использование современных средств обработки видеoinформации даёт возможность построения синтетических трёхмерных изображений инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eyre-Walker R. E. A., Earp G. K. Application of Aerial Photography to Obtain Ideal Data for Condition Based Risk Management of Rail Networks / The 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, June 18–20, 2008, Conference Centre, Derby, UK.
2. Лёвин Б. А., Бугаев А. С., Ивашов С. И., Разевиг В. В. Дистанционно-пилотируемые летательные аппараты и безопасность пути // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 152–157.
3. Grey E. Worker drones: maintaining railway tracks from the air, May 16, 2016. [Электронный ресурс]: <http://www.railway-technology.com/features/featureworker-drones-maintaining-railway-tracks-from-the-air-4893229/>. Доступ 24.06.2018.
4. Flammini F., Pragliola C., Smarra G. Railway Infrastructure Monitoring by Drones, 2016. International

Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC 2016), 02–04 November 2016, Toulouse (France), DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.

5. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Наука, 1986. – 189 с.
6. Пассивная радиолокация. Методы обнаружения объектов / Под ред. А. П. Быстрова и А. В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2008. – 318 с.
7. Бугаев А. С., Ивашов С. И., Лёвин Б. А., Недорчук Б. Л., Разевиг В. В. Оценка с помощью беспилотных летательных аппаратов опасности схода снежных лавин в районах прохождения железнодорожных путей // Ренессанс железных дорог: Фундаментальные научные исследования и прорывные инновации / Под ред. Б. М. Лapidуса. – М.: Аналитика Родис, 2015. [Электронный ресурс]: http://www.rslab.ru/downloads/rzd_renaissance.pdf. Доступ 24.06.2018.
8. [Электронный ресурс]: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/archive>. Доступ 24.06.2018.
9. Fischler M., Bolles R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM. – Vol. 24. – No. 6. – 1981. – Pp. 381–395.
10. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press. – 2004. – 672 p.
11. РАСКАН-4/4000. Радиолокатор для зондирования строительных конструкций. [Электронный ресурс]: <http://rascan.ru/download/rzd.mp4>. Доступ 24.06.2018.
12. Pix4Dmapper. [Электронный ресурс]: <https://pix4d.com/product/pix4dmapper/>. Доступ 24.06.2018. ●

Координаты авторов: **Ивашов С. И.** – sivashiv@rslab.ru, **Бугаев А. С.** – bugaev@cos.ru, **Татараидзе А. Б.** – tataraidze@rslab.ru, **Скрёбков А. В.** – skrebkov_av@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.06.2018, принята к публикации 10.08.2018.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17–20–02086. Авторы выражают благодарность сотрудникам Экспериментального железнодорожного кольца в г. Щербинка за содействие в проведении полётов ДПЛА для получения необходимой информации.



ENHANCEMENT OF TRANSPORTATION SAFETY BY REMOTE SENSING DEVICES

Ivashov, Sergey I., Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Bugaev, Alexander S., Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia.

Tataraidze, Alexander B., Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Skrebkov, Alexey V., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

ABSTRACT

Improving safety of rail transportation in the face of increasing speeds and traffic intensity and the presence of a terrorist threat requires introduction of new technical means of surveillance and control. A particular task is development of measures to prevent accidents and catastrophes, as well as to eliminate their consequences. The use of Earth remote sensing

means, which allow to receive information from large areas and with a sufficiently high resolution, can significantly help in implementation of these tasks. The article deals with variants of satellites and remotely piloted aircrafts systems receiving information in various ranges of the electromagnetic spectrum. Their advantages and disadvantages, opportunities of joint use are analyzed.

Keywords: rail transportation safety, remote sensing of the Earth, satellites, remotely-piloted aircraft, aerial photography, radar sounding, image processing.

Background. In scientific publications of recent years [1–7], the possible applications of remotely piloted aircrafts (RPA) and other remote sensing facilities, including ground survey satellites, in order to ensure rail transportation safety, are shown in sufficient detail.

Earth remote sensing (ERS) is a method of obtaining information about an object or phenomenon without direct physical contact with the object itself, for example, from air or space vehicles. Such information can be obtained in different ranges of electromagnetic waves, but other types of emissions and parameters can be recorded as well: radiation, gravity, terrain measurements, etc. Sounding methods are divided into passive methods (naturally reflected or secondary thermal emissions of objects on the Earth's surface due to solar activity is used) and active methods (using stimulated emission of objects initiated by an artificial source of directional action, for example, by radar or laser). Depending on the problem to be solved, one or another type of equipment carrier and its composition should be used.

Objective. The objective of the authors is to consider provision of transportation safety by means of remote sensing.

The article is devoted to the study of the possibility of combined use of various data sources.

Methods. The authors use engineering methods, comparative analysis, physics, geodesic, attelitte navigation, IT and mathematical methods.

Results.

Advantages and disadvantages of RPA

If RPA were used previously exclusively for military purposes, it is now their civilian application that is becoming increasingly relevant. The initial interest of

the military, which arose in the late 1960s, was dictated by the desire to avoid life risks for crews while performing reconnaissance flights, as well as strikes at explored targets. The drawback of those aircrafts was the need to return to their territory after completing the mission to develop films with captured images and to interpret obtained materials. This reduced the immediacy of obtaining information.

Further, the most successful development of RPA took place in Israel (tactical and operational-tactical devices and the USA (operational-tactical and strategic RPA). Progress in development of their new generation is primarily associated with the advent of digital devices, including cameras operating in different wavelength ranges, satellite navigation aids and satellite communications. This significantly improved the characteristics of the on-board equipment, primarily mass dimensional features, and allowed to improve the flying qualities of RPA.

Modern civilian RPA are characterized by a lower operating cost and no need to use stationary aerodromes (as a rule, they are launched from mobile catapults or directly from the operator's hand). Particular progress was made in development of multi-rotor helicopter-type devices with electric traction. They are of simple design and cheap. This is due to the lack of such an integral element for conventional helicopters, as the blades' swashplate, and the use of asynchronous control of traction of electric motors, which makes it possible to control movement of the apparatus in flight. The six-rotor RPA, shown in Pic. 1, was used to obtain images of the infrastructure of the VNIIZhT experimental ring in Shcherbinka. Another advantage of this type of RPA is the fact that their use in the railway right of way and



a)



b)

Pic. 1. General view of helicopter-type RPA: a) in flight with a camera installed in a gimbal suspension; b) an operator with a control panel.

at altitudes less than 100 m does not require special permits for flights.

The disadvantage of multi-rotary RPA is a relatively short flight time (usually less than 1 hour) and, consequently, the associated limitations on range and altitude of the flight. However, the type of aircraft is extremely convenient when the operator controlling their flight is directly at or near the site of the event. In this case, information on what is happening on the ground can be obtained in real time, which is necessary, for example, in the aftermath of a railway catastrophe. The increase in flight time can be achieved due to replaceable batteries during intermediate landings, although the limitation on the radius of action remains, and it is significant.

Analysis of satellite resources

While in the 1960s and 1970s the main consumers of satellite information (photo and radar reconnaissance) were military, and the information itself was of a secret nature, in recent decades a significant segment of consumers is a very lucrative civil sector. First of all, the tasks to be solved by the ERS satellites include:

- research of natural resources and rational nature management;
- prediction, flow analysis, monitoring of emergencies and elimination of their consequences;
- exploration;
- weather forecast;
- control over the environment and sources of its pollution;
- agriculture;
- forestry;
- construction and many other industries.

During remote sensing satellites record emissions from the Earth's surface in various ranges of electromagnetic waves. As a rule, multispectral photography and side-scan radars are used. In some cases, for geodetic surveying, laser emission is used to measure the surface relief. The remote sensing data received from a spacecraft equipped with a visible range photo equipment is characterized by a high degree of dependence on transparency of the atmosphere and time of day. Therefore, to remove these limitations, the Earth remote sensing satellites equipped with side-scan radars were developed. Radar images have a worse resolution than optical images, but they make it possible to obtain images regardless of weather and time of day, which is of fundamental importance, for example, for piloting along the Northern Sea Route during the polar night.

At present, ERS satellites together with communication and navigation satellites make up a significant segment of the commercial services offered by the space industry. Often, ERS satellites are created by organizations associated with the military-industrial complex of their countries, which makes it possible to reduce the costs of their development through the continuity of design solutions with military satellites.

Usually, ERS satellites are launched into a so-called solar synchronous orbit (sometimes referred to as a heliosynchronous orbit), which has such parameters that a satellite located on it passes over any point of the Earth's surface in approximately the same local solar time. Thus, the angle of illumination of the Earth's surface will be approximately the same at all satellite passages. Constant lighting conditions are very well suited for receiving by satellites of optical images of the Earth's surface (including satellites for

remote sensing of the Earth, meteorological satellites). The parameters of the solar-synchronous orbits lie in the ranges: the altitude above the Earth's surface is 600–800 km, the period of revolution is 96–100 min, and the orbit inclination is about 98°.

The main advantage of optical ERS satellites is the possibility of obtaining high-resolution images, which can reach 0,3 m. At the same time, these satellites are not all-weather, i.e. they cannot receive an image at night or of a terrain covered by clouds. If the first drawback can still be potentially eliminated, for example, using infrared optics, cloudiness, which in the middle latitudes in winter can conceal the Earth for weeks, and sometimes even months, makes it impossible to use optical satellites. All-weather satellites are areas radar reconnaissance satellites, although they have a worse resolution. In this case, radar provides additional possibilities, for example, obtaining images in different polarizations.

Databases of satellite information

The results of satellite imagery are widely spread thanks to the general availability and ease of operation, for example, through the Internet network. Satellite imagery and maps based on them are used even for solving everyday tasks, including for personal car navigation or taxi calling.

Free space information services, although they have a sufficiently high resolution, do not allow receiving rapid information, it is updated very rarely there. Photo images for the websites are usually obtained from the results of shooting in the warm season, in the absence of snow cover. Such images can be used for some types of analytical work, but do not allow to receive up-to-date information about an interesting event or object. For this, one must turn to specialized organizations selling satellite information. This service is payable, but it gives the opportunity to have data taking into account the customer's wishes: time, place and conditions of shooting, resolution of pictures and other parameters. The information can be either up-to-date, i.e. received recently, or obtained from their databases, accumulated in previous years. The latter is important for the information used for environmental studies, where it is necessary to compare the change in the landscape over a long period.

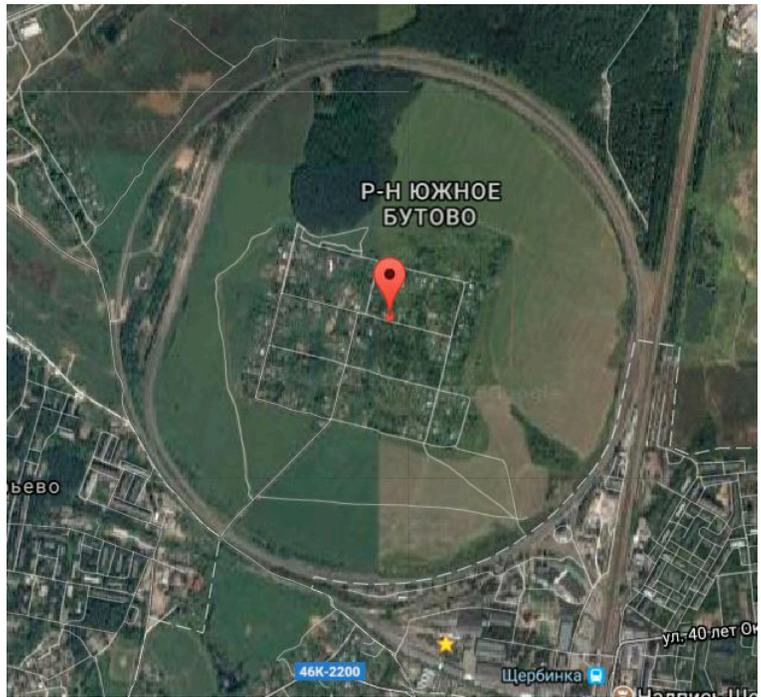
Comparison of information from different carriers

To perform the work on obtaining images of the transport infrastructure of the railways, an experimental ring (ER) of VNIIZhT was chosen. The choice of this object was due to the following circumstances. Firstly, it is well studied and is located close to Moscow. Secondly, because of its experimental status, there was no difficulty with the RPA permission to fly over its territory. Pic. 2 shows the ER image taken from the GoogleMaps database. The center of the ring is marked with a marker, its coordinates are: 55.521373, 37.550190 (northern latitude and east longitude in degrees, respectively). Inside the ring there is a holiday village. The ER itself consists of two double-track rings: external and internal. The outer has the shape of a regular circle, and the inner one contains a rectilinear segment.

In the lower left corner there is a depot. One of the areas of flights the results of which are used in our article, is marked with a square. The asterisk in the square is located on the site of the water tower, which served as a reference point for flights. An enlarged image of the tower obtained from the satellite is shown in Pic. 3.



Pic. 2. The image of ER VNIIZHT from the database Google Maps.



The roof of the tower has a conical shape and is covered with galvanized iron. Individual sheets of iron are joined together in the form of vertical ribs. The ribbed shape of the roof can be clearly seen even on a satellite image. The same area near the water tower was photographed from RPA, equipped with a camera on the gimbal suspension from a height of about 70 m, the result of the shooting is in Pic. 4.

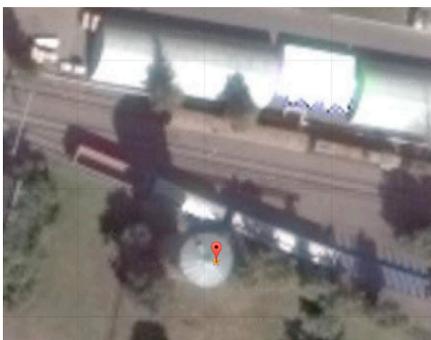
Both pictures differ in location of rolling stock on tracks, since they are made at different times of the year. They also differ in both size and direction of the shadow cast by local objects, because images were taken at different positions of the sun in the celestial sphere. This circumstance underscores the importance of solar synchronous orbits, which were mentioned earlier and are usually intended for ERS satellites. Another advantage of the sun-synchronous orbits is the ability to determine the length of the shadow cast on the images obtained at different turns of the satellite's rotation, whether the object is being built or not and at what speed. Usually, this method is used to decode images of reconnaissance satellites, but it can be used in cadastral surveys, when it is necessary to reveal illegally constructed buildings on

a large array of images. Here it is enough to subtract two images, obtained with a difference of several weeks or months, to fix newly constructed buildings and their height.

If we compare the resolution of both photographs, then it becomes obvious that images made with RPA have a much better resolution than satellite images. This is understandable, since the height of the orbits of ERS satellites is 400–600 km. The RPA have one more advantage over satellites: they are less dependent on weather conditions. In the presence of cloudiness, it is impossible to shoot in the visible spectrum from satellites. While RPA can fly below the cloud boundary and get the information they need.

Radar survey is all weather. Pic. 5 shows two large-scale images of the vicinity of the experimental ring, obtained from the GoogleMaps resource data and the Sentinel-1 radar satellite database [8].

In the lower part of both pictures you can see Ostafyevo airport (on the left in the picture) and ER VNIIZHT (right). Both images have approximately the same scale, but the visible image contains more details than the radar picture. The scale of the above pictures can be easily estimated, given that the outer



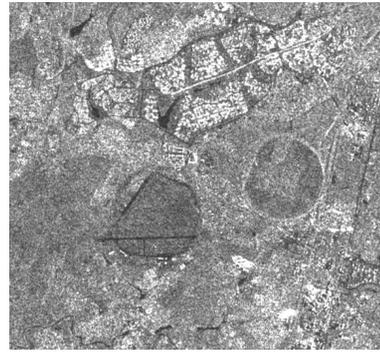
Pic. 3. Large-scale satellite image of the water tower area on the ER.



Pic. 4. Photo of the area of the water tower on the ER, received from RPA.



a)



b)

**Pic. 5. Satellite images of the vicinity of the experimental ring:
a) image of the visible spectrum from the resource GoogleMaps;
b) radar image from the European satellite Sentinel-1.**

ring of the polygon has the shape of a regular circle with a diameter of 1912 m.

The advantage of radar, as indicated, is all-weather and round the clock operation. In some cases, radar images may be the only source of information. In this regard, we can conclude that to solve its tasks, it is important for Russian Railways to have access to a variety of remote sensing facilities.

Building 3D images

Modern image processing tools help to synthesize three-dimensional images of objects on the surface of the Earth on the basis of individual images obtained from RPA. This allows us to view objects from different angles and from different heights. Such technology can find its application in the design of compound infrastructure objects (bridges, tunnels, etc.), and also solve some problems of ensuring their safety.

As initial data for constructing a three-dimensional model of the surface of a piece of land with the railway infrastructure facilities located on it, 176 photographs were taken, collected during the flight of a helicopter-type RPA with six lifting rotors and a Canon EOS5D Mark II camera with a gimbal suspension and Canon EF-S 17–55 f / 2.8 IS USM lens, Pic. 1. Examples of some initial photographs are shown in Pic. 6.

To synthesize a three-dimensional image, the problem of finding a correspondence between key points on different images is solved, it is performed by searching for points with minimally different descriptors – vectors of parameters describing the point. Thus, the SIFT algorithm describes each key point with a vector with 128 parameters, determined on the basis of local gradients in the vicinity of the point.

One of the most effective algorithms for filtering falsely defined correspondences of key points is RANSAC (Random Sample Consensus) [9]. The essence of the method consists in iteratively searching

for a better transformation matrix (fundamental matrix) between randomly selected N key points in one image and the corresponding points in the second one. As a result, points whose deviation as a result of applying the found conversion from the corresponding points on the other image exceeds a predetermined threshold, are removed from a set of key points.

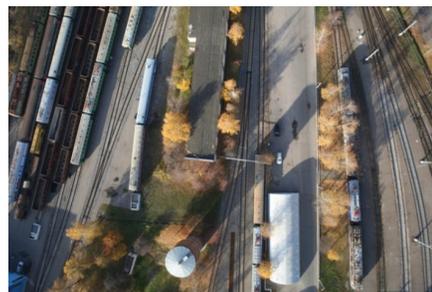
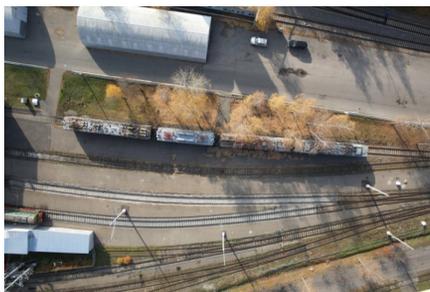
To build a 3D surface model, it is necessary to set internal (focal length, coordinates of the principal point, distortion coefficients) and external parameters of the camera (position and orientation). The internal parameters are independent of external conditions and do not change from the picture to the picture. As a rule, internal parameters are calculated by shooting calibration objects, the geometry of which is known in advance, but can also be calculated without using them, provided there is a large number of pictures with common points [10]. External calibration is performed by triangulation of key points common to two or more frames.

The resulting three-dimensional model of the surface under different angles of observation and from different heights is shown in Pic. 7.

A more complete idea on the model obtained can be got from the video presented in [11]. Some features of the data used to build the model should be noted:

- a relatively small number of pictures;
- non-optimal flight trajectory of RPA;
- small overlap between images;
- lack of information about orientation of RPA and the camera, as well as of data on GPS/GLONASS coordinates.

Despite these features, the model obtained accurately reflects the nature of the terrain where the survey was conducted. The model was constructed using the mathematical support of Pix4DMapper [12].



Pic. 6. Examples of initial images taken by RPA.





Pic. 7. Three-dimensional model of the surface.

Conclusion. *The analysis of the possibilities of using Earth remote sensing devices (ERS satellites and RPA equipped with various sensors) confirms that they can be effective for ensuring traffic safety on the Russian railways. The obtained information can be used to solve other problems, for example, when designing and building a railway infrastructure. The article shows that the effectiveness of remote sensing tools can be increased thanks to combination of satellite information systems and RPA, and the use of modern video processing facilities enables the construction of synthetic three-dimensional images of the infrastructure.*

REFERENCES

1. Eyre-Walker, R. E. A., Earp, G. K. Application of Aerial Photography to Obtain Ideal Data for Condition Based Risk Management of Rail Networks. The 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, June 18–20, 2008, Conference Centre, Derby, UK.
2. Lievin, B. A., Bugaev, A. S., Ivashov, S. I., Razevig, V. V. Distantly Piloted Aircrafts and the Track Security. *World of Transport and Transportation*, Vol. 11, 2013, Iss. 2, pp. 152–157.
3. Grey, Eva. Worker drones: maintaining railway tracks from the air, May 16, 2016 [Electronic resource]: <http://www.railway-technology.com/features/featureworker-drones-maintaining-railway-tracks-from-the-air-4893229/>. Last accessed 24.06.2018.
4. Flammini, F., Pragliola, C., Smarra, G. Railway Infrastructure Monitoring by Drones, 2016. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC 2016), 02–04 November 2016, Toulouse (France), DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.
5. Shutko, A. M. Microwave radiometry of the water surface and soil [SVCh-radiometriya vodnoi poverhnosti i pochvogruntov]. Moscow, Nauka publ., 189 p.
6. Passive radiolocation. Methods of detection of objects [Passivnaya radiolokatsiya. Metody obnaruzheniya ob'ektov]. Ed. by A. P. Bystrov and A. V. Sokolov. Moscow, Radiotekhnika publ., 2008, 318 p.
7. Bugaev, A. S., Ivashov, S. I., Levin, B. A., Nedorchuk, B. L., Razevig, V. V. Evaluation with the help of unmanned aerial vehicles of the danger of avalanches in the areas of passage of railway tracks [Otsenka s pomosh'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov opasnosti shoda snezhnykh lavin v raionah prohozhdeniya zheleznodorozhnykh putei]. Renaissance of railways: Fundamental scientific research and breakthrough innovations. Ed. by B. M. Lapidus. Moscow, Analytica Rodis publ., 2015 [Electronic resource]: http://www.rslab.ru/downloads/rzd_renaissance.pdf. Last accessed 24.06.2018.
8. [Electronic resource]: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/archive>. Last accessed 24.06.2018.
9. Fischler, M., Bolles, R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24, Iss. 6, 1981, pp. 381–395.
10. Hartley, R., Zisserman, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004, 672 p.
11. RASKAN-4/4000. Radar for sounding of building structures [RASKAN-4/4000. Radiolokator dlya zondirovaniya stroitel'nykh konstruksii]. [Electronic resource]: <http://rascan.ru/download/rzd.mp4>. Last accessed 24.06.2018.
12. Pix4Dmapper [Electronic resource]: <https://pix4d.com/product/pix4dmapper/>. Last accessed 24.06.2018. ●

Information about the authors:

Ivashov, Sergey I. – Ph.D. (Eng), head of Remote Sensing Laboratory, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, sivashiv@rslab.ru.

Bugaev, Alexander S. – Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Physics and Mathematics), professor, head of the department of Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia, bugaev@cos.ru.

Tataraidze, Alexander B. – Ph.D. (Eng), junior researcher of Remote Sensing Laboratory, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, tataraidze@rslab.ru.

Skrebkov, Alexey V. – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of Electric Trains and Locomotives of Russian University of Transport, Moscow, Russia, skrebkov_av@mail.ru.

Article received 24.06.2018, accepted 10.08.2018.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 17–20–02086. The authors are grateful to the staff of the Experimental Railway Ring in Shcherbinka for their assistance in conducting RPA flights to obtain the necessary information.