

УДК 007.52  
ББК 32.96-04

## **ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ<sup>1</sup>**

**Явна В. А.<sup>2</sup>, Каспржицкий А. С.<sup>3</sup>, Кругликов А. А.<sup>4</sup>,  
Лазоренко Г. И.<sup>5</sup>, Хакиев З. Б.<sup>6</sup>, Шаповалов В. Л.<sup>7</sup>**  
(ФГБОУ ВПО Ростовский государственный университет  
путей сообщения, г. Ростов)

*Работа посвящена созданию методов сбора, обработки и анализа информации о состоянии объектов транспортной инфраструктуры с учетом взаимодействия с подвижным составом. Конкретизация объектов проводится на основе скоростной (в режиме реального времени) и детальной диагностики, включающей лабораторное определение физико-механических свойств материалов. На основе этих исследований выполнено компьютерное моделирование и определены критические режимы функционирования типовых объектов инфраструктуры и критические значения параметров их физического состояния. Полученные результаты положены в основу требований к системе мониторинга и управления объектами транспортной инфраструктуры*

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №11-08-13140-офи-м-2011-РЖД, №11-08-13152-офи-м-2011-РЖД).

<sup>2</sup> Виктор Анатольевич Явна, доктор физико-математических наук, профессор (vay@rgups.ru).

<sup>3</sup> Антон Сергеевич Каспржицкий, кандидат физико-математических наук, доцент (a.kasprzhitsky@list.ru).

<sup>4</sup> Александр Александрович Кругликов, аспирант (aleksan.kruglikov@yandex.ru).

<sup>5</sup> Георгий Иванович Лазоренко, аспирант (glazorenko@yandex.ru).

<sup>6</sup> Зелимхан Багауддинович Хакиев, кандидат физико-математических наук, доцент (zkhakiev@yandex.ru).

<sup>7</sup> Владимир Леонидович Шаповалов, кандидат технических наук, доцент (cpd@rgups.ru).

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, оценка рисков разрушения, мониторинг, компьютерное моделирование, интеллектуальная система.

## **1. Введение**

Работа посвящена созданию принципов проектирования интеллектуальных систем мониторинга объектов транспортной инфраструктуры железных дорог, позволяющих анализировать их состояние и принимать своевременные решения по обеспечению безопасности движения подвижного состава.

В настоящее время задача оптимальной эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры становится все более актуальной. Известно, что при проектировании объектов инженерных коммуникаций их срок службы в среднем составляет до 80 лет. Отсутствие необходимой информации о параметрах износа конструкций обуславливает директивное назначение времени проведения ремонтных мероприятий, что приводит к преждевременному ремонту одних конструкций и повышенному уровню рисков возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации других. В результате этого происходит значительное увеличение эксплуатационных затрат. Экономическая эффективность процесса эксплуатации сооружений может быть достигнута при помощи прогнозирования изменения надежности конструкций и правильного планирования времени проведения ремонтных работ. Таким образом, актуальной является разработка интеллектуальных систем мониторинга. Особенно актуальной и трудоемкой задачей является прогноз развития деструктивных процессов в структуре конструкций и элементов объектов транспортной инфраструктуры. Разрабатываемая система мониторинга включает, в том числе, возможность контроля развития деструктивных процессов.

Современные системы мониторинга должны обеспечивать: осуществление интеллектуального анализа получаемых данных; выявление факта развития деструктивных процессов; оперативность и достоверность получения информации; автоматический режим выработки предупреждающих сигналов; возможность своевременного принятия управленческих решений.

Разрабатываемая в данной работе система направлена на решение указанных задач мониторинга объектов транспортной инфраструктуры. Особенность указанной системы заключается в том, что при ее проектировании учитываются результаты обследования объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного пути, что позволяет прогнозировать деструктивные процессы на стадии их зарождения. Кроме того, учитываются требования к системе, полученные на основании результатов компьютерного моделирования свойств объектов.

## **2. Скоростное обследование объектов железнодорожной инфраструктуры**

В Стратегических направлениях научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. №964, утвержденных 31 августа 2007 г., повышение эффективности перевозочного процесса рассматривается как приоритетная задача. Ее успешное решение во многом связано с использованием грузового подвижного состава нового поколения, создающего нагрузки до 30 т/ось. Для безопасного движения поездов в таких условиях эксплуатации объектов инфраструктуры необходима надежная конструкция железнодорожного пути, базирующаяся на современных инновационных инженерных решениях и высоком качестве ремонтов, что отметила расширенная выездная секция «Путевое хозяйство» НТС ОАО «РЖД» (г. Анапа, 17 декабря 2010 г.). Материально-техническое обеспечение этого вида работ связано с освоением больших финансовых ресурсов, что делает актуальным получение максимального экономического эффекта от их выполнения. Решение этой задачи стимулирует развитие методов диагностики, включая скоростные, которые позволяют получать непрерывную информацию о фактическом состоянии балласта и земляного полотна на протяженных участках железнодорожного пути [1].

На сети железных дорог существует большое количество объектов (примерно 6% общей протяженности пути) с дефектами и деформациями, которые требуют качественной диагностики и разработки обоснованных мероприятий по стабилизации пути. Систематические наблюдения за состоянием объектов ин-

фраструктуры железных дорог скоростными методами позволят выявлять деформации на ранних стадиях зарождения, контролировать их развитие, анализировать погодные и сезонные изменения основных физико-механических характеристик элементов пути. Такая информация необходима для уточнения заданий на проектирование ремонтов и реконструкции железнодорожного пути, повышения качества проектов за счет разработки мер по устранению зарождающихся деформаций, что приведет к уменьшению затрат на текущее содержание пути.

Среди скоростных методов диагностики в последние годы наиболее интенсивно развивается метод георадиолокации [2]. На железных дорогах мира используются различные георадиолокационные системы (см. [www.zeticarail.com](http://www.zeticarail.com), [www.idsaustoralasia.com](http://www.idsaustoralasia.com), [www.saferailsystem.com](http://www.saferailsystem.com), [www.fugro-aperio.com](http://www.fugro-aperio.com)). При всем разнообразии используемых технических решений, они имеют много общего: размещение оборудования на специально предназначенных подвижных единицах; использование многоканальных георадаров, обеспечивающих высокую скорость обработки информации; оснащение комплекса оборудованием глобального позиционирования и системами управления видеопотоками.

В данной работе рассмотрен созданный программно-аппаратный комплекс (ПАК) для скоростной диагностики состояния железнодорожного пути. В зависимости от характера решаемых задач разработанный ПАК можно использовать в составе подвижных средств – вагонов, диагностических комплексов, мотодрезин и др. ПАК включает антенные блоки с центральной частотой 400 МГц для обследования основной площадки земляного полотна, устройства спутниковой навигации и видеонаблюдения. Работа отдельных вычислителей ПАК синхронизирована по локальной сети. В состав ПАК в настоящее время входят программные продукты, реализующие обработку георадиолокационной информации в режимах реального времени и камеральной обработки, управление видеопотоками и подготовку отчетных форм документов. ПАК обрабатывает параллельно информацию, получаемую одновременно от нескольких каналов. В результате обработки формируются профили и составляющие конструктивных слоев, а также их характери-

ки: наклон грунтовых слоев, влажность, слоистость и деформативность земляного полотна.

Результаты обработки георадиолокационных данных отражаются на экране монитора и сохраняются в памяти компьютера в виде графических и текстовых файлов, сформированных в соответствии с требованиями перспективного программного комплекса «Каскад», анализирующего состояние железнодорожной инфраструктуры в целом. При размещении ПАК на подвижных единицах, не оборудованных собственными системами позиционирования, для решения задачи привязки георадиолокационной информации к железнодорожной системе координат используют ГЛОНАСС/GPS-технологии и электронные карты пути. При проведении георадиолокационных работ в составе комплекса, имеющего собственную систему синхронизации и позиционирования данных в железнодорожной системе координат, ПАК использует данные привязки указанных систем.

Рис. 1 иллюстрирует выполнение алгоритма профилирования георадиолокационных данных (выделение балластного слоя и подбалластного основания), поступающих по трем каналам от двух обочин и оси пути в режиме реального времени.

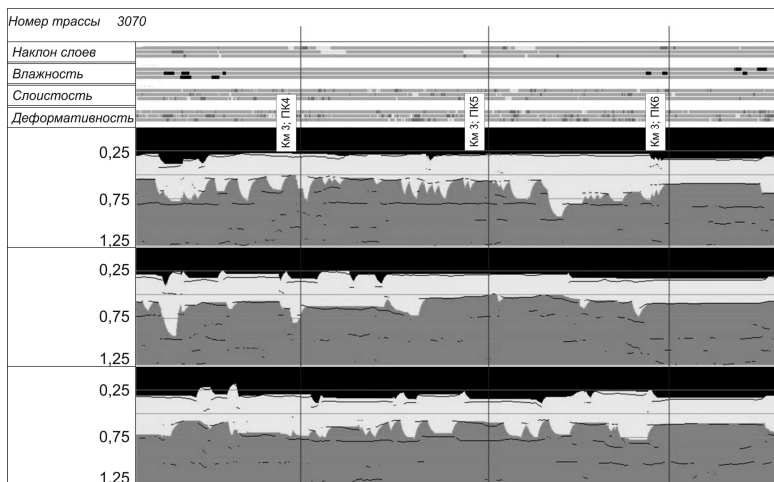


Рис. 1. Результаты обработки георадиолокационных данных

Помимо профилирования ПАК предусматривает вычисление и визуализацию некоторых усредненных физических и геометрических характеристик конструктивных слоев. К ним относятся «наклон слоев», «влажность», «слоистость» и «деформативность».

«Наклон слоев» вычисляется как тангенс угла наклона прямых, аппроксимирующих границы слоев в заданном окне. «Влажность» определяется по интегральной величине сигнала, регистрируемого приемной антенной. «Слоистость» характеризует число зарегистрированных границ в конструктивных слоях, а «деформативность» – среднее значение изменения глубин залегания слоев.

Разработанный ПАК показал высокую скорость обработки информации, достаточную для реализации режима реального времени при установленных в настоящее время скоростях движения вагонов-путеизмерителей/дефектоскопов и доступных средств вычислений.

Окончание работы сопровождается формированием выходных форм документов в текстовом формате, систематический анализ которых позволяет получать информацию о динамике развития деформаций (рис. 2).

Для получения количественной информации о физическом состоянии железнодорожного пути и других объектов инфраструктуры в данном исследовании разработаны методы определения электрофизических параметров по данным георадиолокационных обследований. Обозначим  $E'$  – напряженность электрического поля сигнала, отраженного верхней поверхностью грунта при изменении его влажности.

Тогда отношение сигналов при разной влажности среды  $A = E'E^{-1}$  позволяет получить связь диэлектрических постоянных  $\varepsilon$  при разной степени влажности материала:

$$(1) \quad \sqrt{\varepsilon'} = \frac{-\sqrt{\varepsilon}(A+1) + (A-1)}{\sqrt{\varepsilon}(A-1) - (A+1)}.$$

С другой стороны, изменение влажности грунта приводит к изменению скорости распространения сигнала. Пусть  $m$  и  $m'$  – видимые толщины слоя при разных влажностях, выраженные в точках трассы радарограммы;  $c$  – скорость света в вакууме. То-

гда из выражения истинной толщины слоя несложно получить второе уравнение, связывающее диэлектрические проницаемости сред при разной влажности:

$$(2) \quad \varepsilon' = \varepsilon \left( \frac{m'}{m} \right)^2.$$

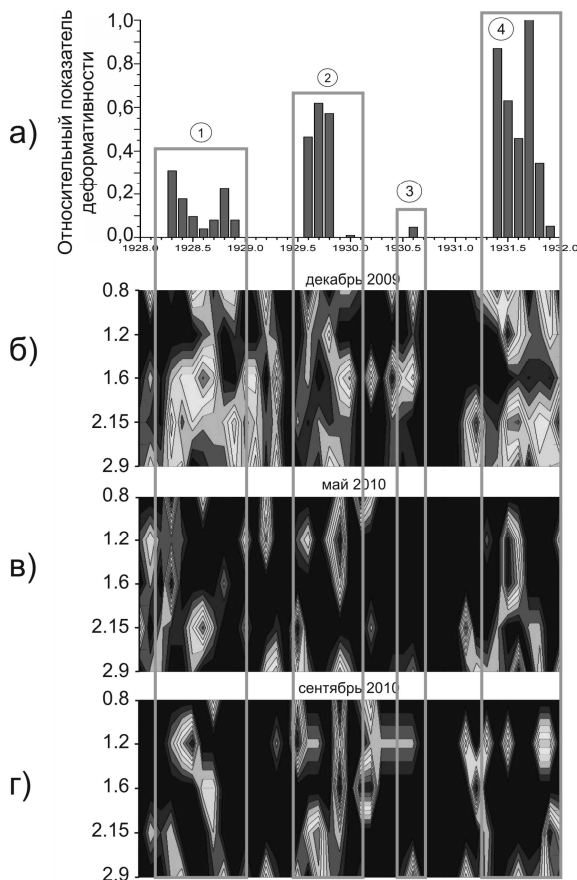


Рис. 2. Сравнение результатов обработки лент вагона-путеизмерителя и послойного георадиолокационного сканирования в декабре участка Сочинской дистанции пути [а) данные вагона путеизмерителя; б), в), г) изменение влажности по глубине в различные периоды времени]

Для удельных проводимостей грунта, определяя из радарограмм коэффициент затухания  $p$ , можно получить:

$$(3) \quad \sigma' = 2\sqrt{\varepsilon'} \frac{p' - p}{\mu_0 c} + \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\sqrt{\varepsilon}} \sigma,$$

$$(4) \quad \sigma'^2 = (\varepsilon' - \varepsilon) \varepsilon' \frac{4\omega^2}{\mu_0^2 c^4} + \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sigma^2,$$

где  $\sigma$  и  $\sigma'$  – удельные проводимости грунта при разной влажности;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\omega$  – среднее значение круговой частоты в вакууме;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Системы уравнений (1)–(2) и (3)–(4) позволяют рассчитать диэлектрические проницаемости и удельные проводимости грунтовых слоев при изменении влажности. Указанные физические параметры могут использоваться для определения изменения влажности материалов инженерных объектов, согласно полученным соотношениям:

$$\varepsilon' = \varepsilon + \Delta w \varepsilon_w, \quad p = p_0 + \beta \frac{\Delta w}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \quad \Delta w = \frac{\mu_0^2 c^4 (\sigma'^2 - \sigma^2)}{4 \varepsilon_1 \varepsilon_w \omega^2},$$

где  $\varepsilon_w$  – диэлектрическая проницаемость воды;  $p_0$  – коэффициент затухания;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость сухого материала. Влажность земляного полотна, регулярно определяемая по данным георадиолокации, может стать критерием оценки эффективности работы дренажных конструкций.

### **3. Комплексное обследование объектов железнодорожной инфраструктуры**

Применение скоростных методов обследования инженерной инфраструктуры железнодорожного пути позволяет выявлять объекты, требующие повышенного внимания из-за накопившихся деформаций или высокой скорости их развития. Такие участки железнодорожного пути требуют детального комплексного обследования современными геофизическими и лабораторными методами. В качестве примера такой участок выделен на четвертом пикете третьего километра (рис. 1). Он характеризуется сверхнормативным углублением балластного



слоя и подбалластного основания, которое характеризуется большой крутизной и повышенным увлажнением. Кроме этого существуют инженерные объекты, обследование которых скоростными методами затруднено. Современные геофизические комплексы методов включают в себя методы анализа взаимодействия электромагнитного (электроразведка, георадиолокация) и вибрационного (вибро- и сейсморазведка) полей в широком частотном диапазоне с обследуемой конструкцией, определение ее свойств анализом взаимодействия с измерительными приборами (пенетрация), бурение скважин с отбором образца грунта, эндоскопия и лабораторные испытания.

#### ***4. Метод компьютерного моделирования для исследования влияния природных и техногенных воздействий при проектировании и текущем содержании объектов транспортной инфраструктуры***

Ключевой задачей при строительстве и реконструкции железных дорог является обеспечение высокого качества и надежности всех элементов инфраструктуры. Метод компьютерного моделирования в некоторых случаях является единственно возможным методом исследования надежности конструкций. Естественно, что в создаваемые математические и компьютерные модели должны закладываться результаты предварительных исследований природных и техногенных условий эксплуатации объектов инфраструктуры, характеристики конструкции и свойств используемых материалов.

В качестве примера можно привести создание в рамках данного исследования компьютерной модели реки Мзымта и расчеты ее гидродинамического режима, реализующегося один раз за триста лет. Это позволило уточнить параметры проектирования берегозащитных сооружений вблизи строящихся олимпийских объектов (между пятым и шестым туннелями), а также предложить новые конструкции берегозащитных сооружений вблизи строящегося железнодорожного полотна [3].

Практика транспортного строительства показала, что в ряде случаев серьезные проблемы в эксплуатации дорог создают де-

формации земляного полотна, появляющиеся после ввода линий в эксплуатацию. Наиболее подверженными к воздействию силовых и природно-климатических факторов являются верхние конструктивные слои, в связи с чем основания дорог должны проектироваться с учетом этих особенностей. Увеличение грузонапряженности линии, повышение скорости движения транспортных средств, осевых и погонных нагрузок усложняет текущее содержание дорог, приводит к росту объемов выполняемых при этом работ, повышает риск развития деформаций. Являясь источником вибродинамического воздействия, транспортные средства вызывают пульсацию напряжений в грунтах земляного полотна, следствием чего являются процессы образования остаточных деформаций.

Очевидно, что рассматриваемое взаимодействие необходимо анализировать с учетом природно-климатического состояния объекта. Комплексное решение этой задачи возможно при согласованной разработке технологий анализа и прогноза состояния объектов на основе моделирования критических режимов функционирования этих объектов. Геофизические исследования, лабораторные испытания и компьютерное моделирование процессов распространения электромагнитных и виброакустических волн (рис. 3) позволили уточнить параметры конструкции насыпи и физические свойства ее конструктивных слоев.

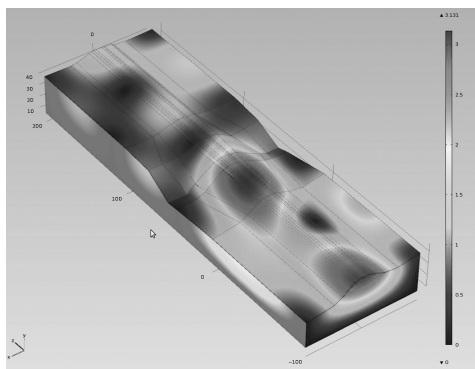


Рис. 3. Моделирование вибро-акустических процессов в теле насыпи

Эти данные легли в основу графоаналитического способа проверки устойчивости откоса, заключающегося в построении теоретических кривых возможного обрушения и подсчете сдвигающих и удерживающих сил с учетом пиковых динамических нагрузок. Результаты расчета представлены на рис. 4. Видно, что при влажности слагающих грунтов выше 20% состояние откосов переходит в неустойчивое состояние и стабилизация конструкции может быть достигнута только за счет снижения (если это возможно) динамических и статических нагрузок.

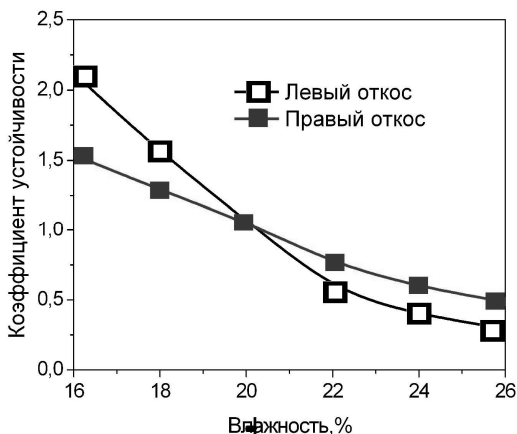


Рис. 4. Расчет коэффициента устойчивости откосов насыпи

Выявленные на основе моделирования критические параметры функционирования данных объектов могут быть использованы для разработки систем мониторинга, обладающих элементами искусственного интеллекта. Такие системы призваны не только сигнализировать о возможном отказе элемента инфраструктуры, но и принимать решения по организации движения транспорта с учетом фактического состояния объекта.

## **5. Обоснование общих требований к разработке систем мониторинга объектов транспортной инфраструктуры**

Интеллектуальная система мониторинга объектов транспортной инфраструктуры предназначена для решения следующих задач: мониторинг потенциально опасных объектов транспортной инфраструктуры железных дорог; осуществление информационного обеспечения лабораторного контроля и прогнозирование деструктивных процессов природного и техногенного характера.

Создание системы мониторинга обусловлено необходимостью совершенствования работ в области своевременного выявления и предупреждения угроз техногенного и природного характера на сети железных дорог в отношении критически важных объектов и потенциально опасных объектов инженерной инфраструктуры.

Целью создания системы мониторинга является последовательное снижение до минимального уровня риска воздействия на объекты инженерной инфраструктуры факторов техногенного и природного характера, что позволит минимизировать ущерб, возникший при отсутствии оперативного контроля опасных объектов транспортной инфраструктуры.

Задачей системы мониторинга является информационная поддержка разработки и реализации мер по своевременному прогнозированию, выявлению и предупреждению угроз техногенного и природного характера.

Система мониторинга должна обеспечивать выполнение следующих функций: сбор, обработка, анализ, хранение и передача информации об обобщенных параметрах состояния защищенности объектов транспортной инфраструктуры и других необходимых данных; информационная поддержка работ, выполняемых в целях подготовки и реализации мер по обеспечению безопасного функционирования объектов транспортной инфраструктуры, предупреждению и локализации кризисных ситуаций, а также ликвидации их последствий; прогнозирование угроз объектам и динамики изменения состояния их защищенно-

сти под влиянием природных, техногенных и других факторов; ведение информационных баз данных для обеспечения поддержки принятия и реализации управленческих решений по защите объектов; предоставление в установленном порядке информационных ресурсов системы мониторинга, обеспечение защиты этих ресурсов от несанкционированного воздействия; формирование единого информационного пространства системы мониторинга на основе унификации и совместимости информационных, программных и аппаратных средств.

Система мониторинга может являться составной частью мониторинга состояния сети железных дорог. При этом в состав системы мониторинга должны быть включены: автоматизированное рабочее место, которое является центром системного мониторинга и оперативного управления (далее – АРМ); системы, комплексы и средства получения информации об обобщенных параметрах состояния защищенности объектов; системы и средства телекоммуникаций, сбора, передачи данных и оповещения.

Объединение информационных ресурсов АРМ и системы мониторинга осуществляется с использованием систем и средств телекоммуникации, при этом учитывается необходимость обеспечения конфиденциальности информации и санкционированного удаленного доступа к их базам данных. При решении возложенной на систему мониторинга задачи должна быть предусмотрена возможность информационного взаимодействия АРМ с другими информационными системами общего и специального назначения.

При создании и использовании системы мониторинга необходимо руководствоваться следующими основными принципами: обеспечение соответствия задачи, решаемой системой мониторинга, а также ее структуры и характеристик уровню угроз в отношении объектов транспортной инфраструктуры; организационное, информационное и функциональное единство системы мониторинга, основу которого составляют единая система классификации и кодификации угроз объектам, показателей и критериев оценки состояния защищенности объектов, а также базовые (типовые) протоколы, алгоритмы (программы) сбора, обработки и обмена информацией, подготовки и автоматизирован-

ной поддержки принятия и реализации управленческих решений на основе данных мониторинга; иерархичность построения системы мониторинга, возможность централизованного и санкционированного децентрализованного использования ресурсов системы мониторинга; рациональная функциональная совместимость АРМ и центров мониторинга, входящих в состав единой системы мониторинга сети железных дорог; унификация программных, информационных и технических средств, обеспечение совместимости элементов системы мониторинга, возможности ее модульного наращивания и модернизации; возможность структурного и функционального развития, оптимизации состава пользователей системы мониторинга и спектра оказываемых услуг; преемственность, основанная на интеграции и совершенствовании иных систем мониторинга; гарантированная защита информации от несанкционированного доступа; недопущение зависимости системы мониторинга от иностранных технологий.

Основными направлениями работ в области создания, использования и развития системы мониторинга являются: организационное и финансово-экономическое обеспечение системы мониторинга; совершенствование нормативно-правовой базы; создание и внедрение перспективных научно-технических разработок.

В области организационного и финансово-экономического обеспечения системы мониторинга необходимо решить следующие задачи: разработка технико-экономического обоснования мероприятий по созданию и применению системы мониторинга, комплексной увязке ее составных частей; анализ иных систем мониторинга, обеспечение унификации технических и организационных решений.

Основными направлениями деятельности в области создания и внедрения перспективных научно-технических разработок являются: отработка типовых (унифицированных) технических и организационных решений создания и использования системы мониторинга; разработка единой системы критериев и комплексных методик анализа обобщенных параметров состояния защищенности объектов; создание в рамках системы мониторинга специализированных средств сбора и передачи информации, функционирующих на всей территории Российской Феде-

рации; развитие систем дистанционного мониторинга объектов; создание мобильных (перебазируемых) центров мониторинга, обеспечивающих информационную поддержку деятельности, осуществляемой при возникновении кризисных ситуаций.

### **Литература**

1. КОЛЕСНИКОВ В.И., ЯВНА В.А., ВОРОБЬЕВ В.Б. и др. *Особенности обработки георадиолокационных данных, получаемых в непрерывном скоростном режиме* // Тр. междунар. науч.-тех. конф. «Современные проблемы путевого комплекса. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований». – М. : МИИТ, 2004. – С. 11–42.
2. КОЛЕСНИКОВ В.И., ВОРОБЬЕВ В.Б., ЯВНА В.А., КИРЕЕВНИН А.Б., ПОМОЗОВ В.В., ДУДНИК А.В.. *Георадиолокационная диагностика пути* // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – №3. – С. 19–21.
3. ХАКИЕВ З.Б., КРУГЛИКОВ А.А., ЯВНА В.А. *Моделирование гидродинамических режимов реки Мзымта* // Инженерные изыскания. – 2011. – сентябрь – С. 62–65.

## DESIGN STAGES OF INTELLIGENT SYSTEM FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE MONITORING

**Victor Yavna**, Rostov state transport university, Doctor of Science, professor (vay@rgups.ru)

**Anton Kasprzhitsky**, Rostov state transport university, Cand.Sc., associate professor (a.kasprzhitsky@list.ru).

**Alexander Kruglikov**, Rostov state transport university, graduate student (aleksan.kruglikov@yandex.ru).

**Georgy Lazorenko**, Rostov state transport university, graduate student (glazorenko@yandex.ru).

**Zelimkhan Khakiev**, Rostov state transport university, Cand.Sc., associate professor (zkhakiev@yandex.ru).

**Vladimir Shapovalov**, Rostov state transport university, Cand.Sc., associate professor (cpd@rgups.ru).

*Abstract: We develop data collection, processing and analysis methods for transport infrastructure condition assessment, which take into account its interaction with the rolling stock. Analytic methods combine express (real-time) and detailed (including laboratory tests of physical and mechanical properties of materials) diagnostic routines. These methods are used in computer simulations, which give estimates of critical regimes for typical infrastructure objects as well as the critical values of basic physical and mechanical properties of materials. These estimates form the basis of requirements for a transport infrastructure monitoring and management system.*

**Keywords:** transport infrastructure, evaluation of destruction risks, monitoring, computer modeling, intelligent system.