

# АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## AEROSPACE MONITORING FOR LINEAR NATURAL-TECHNICAL SYSTEM

**РЕВЗОН А.Л.**

Зав. отделом ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (ОАО «ЦНИИС»), д.геогр.н., г. Москва, RevzonAL@tsniis.com

**REVZON A.L.**

The head of a department of the «Research Institute of Transport Construction» PJSC (the «TsNIIS» PJSC), Moscow, RevzonAL@tsniis.com

### Ключевые слова:

природно-технические системы (ПТС); мониторинг; аэрокосмическое зондирование; управление состоянием природно-технических систем; геоинформационные системы (ГИС); линейные сооружения; опасные природные и природно-техногенные процессы; предаварийные состояния; аварии.

### Key words:

natural-technical systems (NTS); monitoring; aerospace sensing; linear natural-technical system state management; geoinformation systems (GIS); line structures; hazardous natural and natural-technogenic processes; pre-emergency states; emergencies.

### Аннотация

**В статье рассматриваются основные положения теории, методологии, технологии и практики предупреждения критических состояний линейных природно-технических систем (ПТС) в районах со сложными ландшафтно-климатическими и инженерно-геологическими условиями с помощью аэрокосмического зондирования в сочетании с наземными экспресс-методами оценки параметров состояния ПТС с последующим созданием специализированных геоинформационных систем (ГИС), направленных на своевременное обнаружение предаварийных ситуаций и предотвращение природно-техногенных аварий.**

### Введение

От того, насколько полно изучены ландшафтно-климатические и инженерно-геологические условия районов предстоящего строительства и как они будут меняться в процессе него, зависит безопасность возводимых сооружений и окружающей среды. Например, проект железной дороги Курагино — Кызыл, разработанный до произошедшего 27 декабря 2011 г. 8–9-балльного землетрясения с эпицентром примерно в 100 км к востоку от г. Кызыла, требует пересмотра принятых инженерных решений на основе новых системных исследований района предполагаемого строительства по методологии мониторинга природно-технических систем (ПТС).

Понимая под ПТС различные структуры, в которых осуществляются взаимодействия между природными компонентами и инженерными сооружениями на всех стадиях их создания и функционирования, автор на разных этапах выполняемых в данном направлении исследований придерживался постулата о том, что основными функциями мониторинга природно-технических систем являются не только периодические наблюдения за динамикой их состояния под влиянием различных факторов, но и управление этим состоянием в целях предупреждения аварийных ситуаций. То есть без наблюдений невозможно эффективное управление.

Однако далеко не все исследователи разделяют эту точку зрения. Ряд специалистов в области мониторинга природной среды придают ему лишь функцию периодических наблюдений, считая управление ПТС не природоведческой, а технической задачей. Такие противоречивые мнения возникли на заре развития мониторинга как направления науки и практики в середине 70-х гг. прошлого столетия. И они су-

### Abstract

**The article considers the fundamentals of theory, methodology, technology and practice of preventing critical states of linear natural-technical systems (NTS) in the areas under difficult landscape-climatic and engineering-geological conditions using aerospace sensing in combination with ground-based express methods of assessing the NTS state parameters and subsequent creating specialized geoinformation systems aimed at timely finding pre-emergency situations and preventing natural-technogenic accidents.**



ществуют до настоящего времени, т.к. мониторинг ПТС, за исключением единичных примеров, имел и имеет не системный и комплексный, а компонентно-отраслевой характер. Общеизвестны методологии и опыт проведения мониторинга в климатологии, лесном хозяйстве, инженерной геологии (мониторинга геологической среды, литомониторинга, сейсмомониторинга, экзодинамического мониторинга), землепользовании, а также строительного мониторинга [1, 2, 4, 6–8, 10, 12]. Однако количество природно-техногенных аварий, возникающих при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений, особенно в сложных природных условиях, за последнее 20-летие неуклонно растет, несмотря на проведение мониторинга в вышеуказанных направлениях.

Общеизвестно, что в наши дни прокладка трасс протяженных линейных сооружений (нефте- и газопроводов, транспортных магистралей, высоковольтных ЛЭП, оросительных систем) в районах с экстремальными природными условиями осуществляется без своевременной проработки и обоснования их трассирования и должного учета развития и активизации под влиянием строительства опасных природных процессов (оползней, селей, лавин, обвалов, карста, подтопления, размывов, абразионно-аккумулятивных процессов в береговых зонах, а также процессов, связанных с изменениями мерзлотных условий). И, несмотря на обязательное выполнение в процессе строительства соответствующего строительного мониторинга (в т.ч. и экологического), от разрушения созданных сооружений под воздействием активизации опасных процессов мы не застрахованы.

Примеры катастрофических разрушений последних лет известны на строящихся объектах Олимпиады-2014 в районе Большого Сочи, на стройках в Республике Саха (Якутия), на эксплуатирующихся объектах в Республике Хакасия, на железнодорожной станции Березняки в Пермском крае и т.д. Во всех этих случаях должным образом не осуществлялся системный анализ ПТС на этапах планирования размещения сооружений на местности и их проектирования, хотя проектные решения должны приниматься с учетом данных о возможном воздействии на сооружения опасных природных процессов. В их обосновании и в своевременном проведении мониторинговых исследований, в т.ч. в процессе эксплуатации сооружений, должны участвовать специалисты различных направлений.

Вместе с тем опубликовано много работ, провозглашающих проведение мониторинга ПТС с системных позиций. Существуют даже организации и подразделения ряда компаний, основной задачей которых является проведение мониторинга природно-технических систем. Ознакомление с результатами выполняемых ими исследований показывает, что, по сути, их работы не выходят за рамки компонентно-отраслевого мониторинга.

В материалах (на картах и схемах), содержащих результаты наблюдений за состоянием природной среды, отражается главным образом динамика ее компонентов без соответствующей оценки состояния инженерных сооружений, находящихся под их влиянием. В лучшем случае на картах показывается тип, конфигурация и местоположение инженерных сооружений, но не их техническое состояние и работоспособность. В таком мониторинге, выполняемом природоведами (гидрологами, климатологами, географами, геологами, экологами), не участвуют специалисты, владеющие основами инженерного дела.

По данным строительного мониторинга, наоборот, оценивается техническое состояние возводимых и эксплуатируемых сооружений с оценкой напряженно-деформированного состояния конструкций и их узлов, степени их повреждений от воздействия различных факторов, остаточного ресурса и практически никак не оценивается характер природных воздействий, например морфология, типизация, степень активности и тенденции проявления опасных природных процессов, приводящих к размывам, деформациям или разрушениям инженерных сооружений. Здесь, наоборот, не участвуют специалисты-природоведы, способные исследовать и оценивать состояние природных компонентов.

Хотелось бы отметить, что автор ни в коем случае не является противником реализации компонентно-отраслевых направлений мониторинга и считает, что различные виды мониторинга (климатического, лесного, гидрологического, земельного, инженерно-геологического, экологического, строительного) весьма эффективны для решения конкретных отраслевых задач. Однако в случаях, когда намечается и проводится масштабное хозяйственное освоение регионов со сложными природными условиями, сопряженное со строительством или реконструкцией протяженных линейных сооружений (трасс нефте- и газопроводов, железных и автомобильных дорог, водохозяйственных и энергетических сооружений), выполнение мониторинга ПТС должно осуществляться с системных позиций — именно так, как это предписывается действующими федеральными нормативными документами [18, 19], а компании, которые претендуют на выполнение мониторинга ПТС, должны иметь необходимые кадровые ресурсы и технические средства для его выполнения в соответствии с требованиями этих документов.

#### **Научно-методическая и технологическая база аэрокосмического мониторинга линейных природно-технических систем**

Методология мониторинга для обоснования системы управления состоянием природно-технических систем развивается уже более 35 лет. За это время были созданы научные основы и накоплен большой опыт проведения мониторинга различных типов ПТС [1, 2, 4, 6–16, 20]. Базиру-

ясь на этом опыте, автор создал методологию мониторинга линейных ПТС, в основу которой было положено сочетание аэрокосмического зондирования, наземных методов экспресс-диагностики состояния ПТС на сложных участках и системы специализированного оценочного картографирования состояний ПТС с применением ГИС-технологий (рис. 1). Применяя данную методологию на всех этапах создания и функционирования линейных сооружений, мы получаем своеобразную систему управления состоянием природно-технических систем (рис. 2), позволяющую своевременно фиксировать и предупреждать аварии и катастрофы, связанные с влиянием на инженерные сооружения опасных природных процессов и с воздействием нештатных ситуаций в состоянии инженерных сооружений на природную среду. Окончательные цифровые карты в широком масштабном диапазоне информационно обеспечат обоснование принятия управленческих решений на всех уровнях управления ПТС. Рассмотрим основные позиции этой методологии.

### Принципы аэрокосмического мониторинга линейных ПТС

Концепцию мониторинга линейных ПТС можно выразить в виде таких условных принципов, как: (1) комплексность; (2) систематичность и периодичность; (3) автоматизация получения и об-

работки данных с широким использованием современных информационных технологий.

*Комплексность.* В качестве объектов мониторинга необходимо рассматривать все элементы природно-технической системы (сооружения и природную составляющую) как взаимообусловленные. Например, применительно к газопроводам надо рассматривать собственно трубопровод, сооружения инфраструктуры газопроводной системы (компрессорные и насосные станции, хранилища углеводородного сырья и др.), а применительно к железнодорожным магистралям — верхнее строение пути, земляное полотно, мосты, тоннели, сооружения железнодорожной инфраструктуры (станции и транспортные здания, узлы, сооружения электрификации и др.) во взаимодействии с основанием и прилегающими геомассивами на всей площади влияния развивающихся в них природных и техногенных процессов с учетом климатических, ландшафтных и социальных факторов. Только комплексный подход позволяет дать правильную оценку и прогноз работы сооружения под нагрузками и выявить прямые и обратные связи между природной и технической составляющими ПТС.

*Систематичность и периодичность.* Опыт последних 10–15 лет показал, что на этапах обоснования инвестиций и разработки проектной документации не всегда удается обосновать прогнозные схемы взаимодействия конструкций и

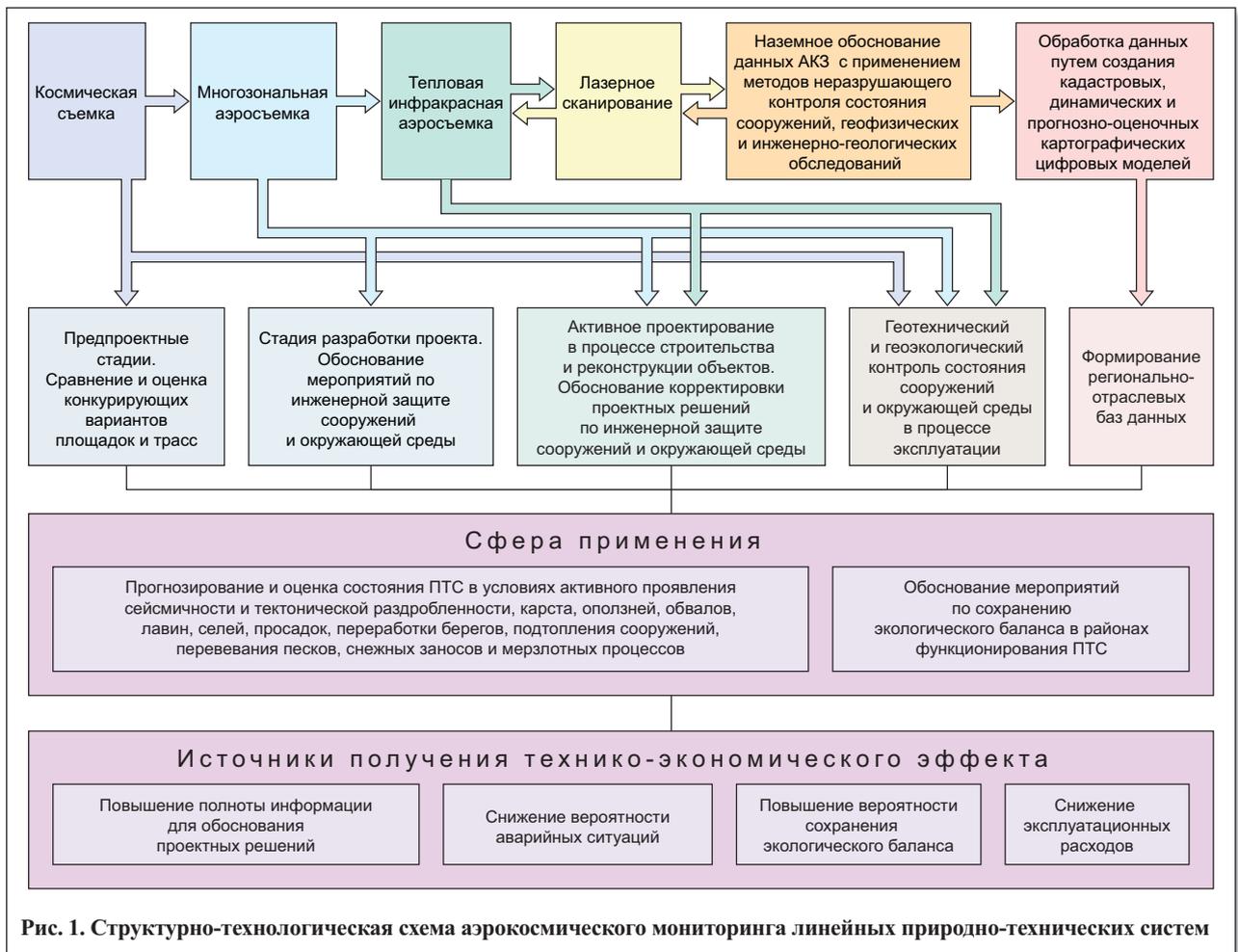


Рис. 1. Структурно-технологическая схема аэрокосмического мониторинга линейных природно-технических систем



сооружений с природными факторами, в частности с геологической средой и климатическими параметрами. Более того, стремительно изменяющийся климат планеты и активизация сейсмической активности, сопровождающиеся интенсификацией опасных природных и природно-техногенных процессов (оползней, селей, лавин, наводнений, осадки поверхности земли в мегаполисах), являются причинами быстрого устаревания имеющейся инженерно-геологической и природно-ресурсной информации, закладываемой в проекты сооружений. В этих условиях далеко не всегда возможно своевременное обновление этих данных, поэтому проведение специальных исследований по методологии мониторинга ПТС весьма актуально, причем перманентным образом, т.е. циклично на разных этапах строительства и эксплуатации сооружений, например, начиная с периода завершения строительства (I этап), в период временной эксплуатации сооружений (II этап) и в предреконструкционный период (III этап). Между этими обязательными этапами организации, осуществляющие постоянную эксплуатацию сооружений, могут являться заказчиками специальных дополнительных мониторинговых исследований для контроля технического состояния сооружений и окружающей среды в случаях возникновения нештатных ситуаций (таких как отказы работы сооружений, обнаружение их дефектов, возникновение природных аномальных явлений, получение данных о возможных террористических актах и др.).

*Автоматизация получения и обработки данных с широким использованием современных ин-*

*формационных технологий.* Получившие приоритет во всем мире, информационные технологии являются стержневой основой методологии мониторинга, базирующейся на быстром получении высокоточной информации о состоянии параметров объекта (качественных и количественных), в т.ч. напряженно-деформированного состояния конструкций и узлов сооружений, что осуществляется методами неразрушающего контроля с применением соответствующей диагностической аппаратуры.

В системах мониторинга протяженных линейных объектов, сооружаемых в сложных природных условиях (в зонах интенсивной геодинамики, на труднодоступных территориях в условиях горного рельефа, в таежных и болотистых районах), эффективно применение комплексного аэрокосмического зондирования (АКЗ). Его данные позволяют своевременно выявлять участки возможных предаварийных и аварийных ситуаций, на которых впоследствии проводятся работы по оценке состояния конструкций и сооружений методами их неразрушающего контроля и определяются параметры компонентов природной среды, влияющие на техническое состояние сооружений.

При очевидной эффективности существующих аэрокосмических и наземных методов неразрушающего контроля необходимо их рациональное сочетание (комплексирование) с учетом их особенностей, характеристик и способов применения.

Отработка методического обеспечения работ по оценке и прогнозированию состояния ПТС различных типов на различных этапах строи-

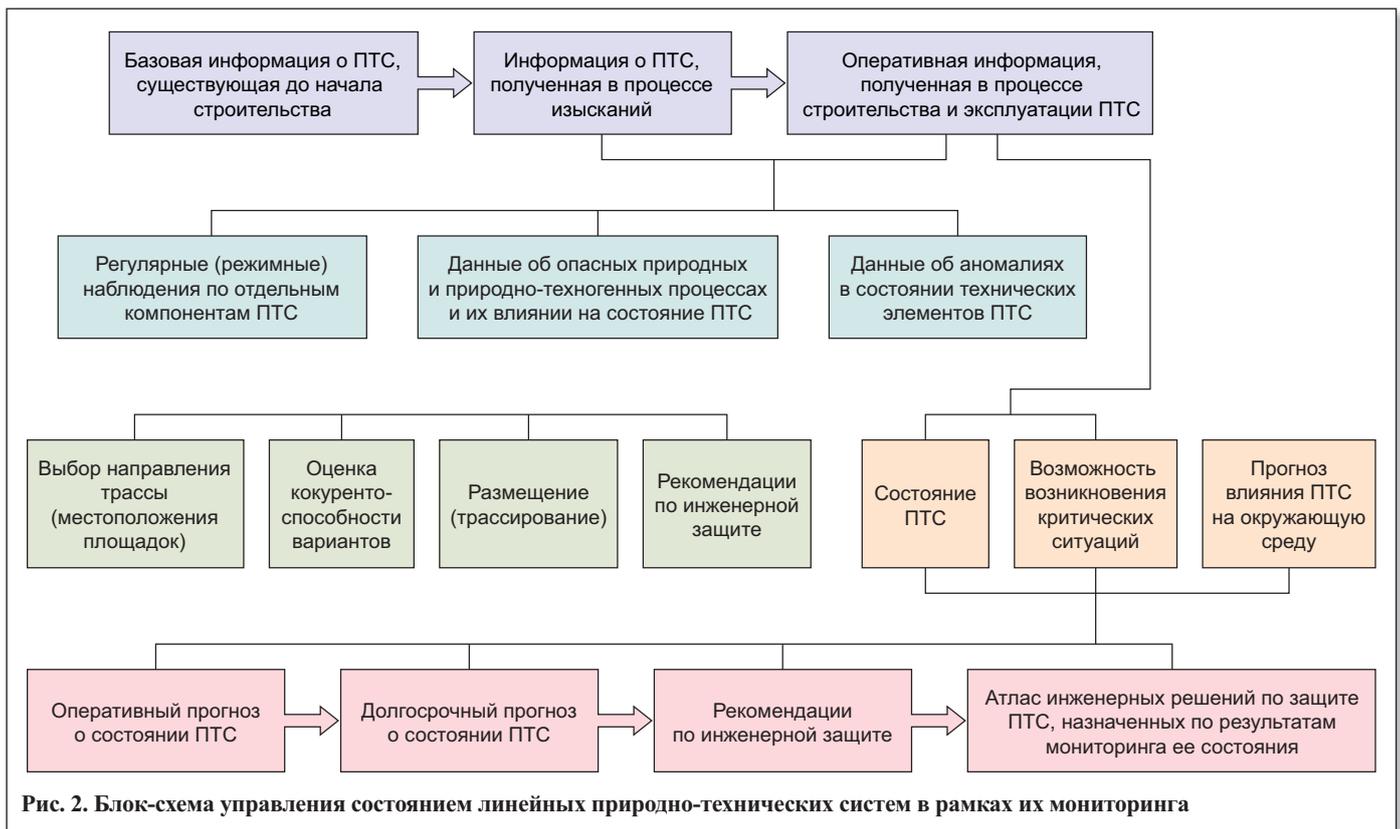


Рис. 2. Блок-схема управления состоянием линейных природно-технических систем в рамках их мониторинга

тельства и эксплуатации сооружений с использованием в системе мониторинга оригинальных структурно-технологических схем представляет собой технологическое кредо научных организаций в области мониторинга природно-технических систем применительно к различным ландшафтно-климатическим и инженерно-геологическим условиям.

Мониторинг ПТС методами аэрокосмического зондирования, как правило, является опережающим, позволяет оптимизировать пространство и объемы комплексных изыскательских работ уже на предпроектном этапе. При этом данные наземных обследований позволяют наполнить количественными и качественными характеристиками структуру контуров, получаемых при дешифрировании материалов АКЗ.

Основой дешифровочного процесса материалов АКЗ являются ландшафтные исследования с учетом взаимодействия и взаимообусловленности природных компонентов. Соответственно выполняется ландшафтно-индикационный анализ, использующий образы (внешнее отображение) ландшафтов (рельефа, грунтов, растительного покрова, гидрографической сети и др.), являющиеся косвенными индикаторами для распознавания свойств компонентов, скрытых от визуального наблюдения (горных пород, стратиграфии, подземных вод, протекающих в них природных процессов и др.), — объектов индикации.

При мониторинге ПТС ландшафтно-индикационный анализ является основой для составления по материалам АКЗ кадастровых карт, фиксирующих фоновое состояние среды и уровень техногенных изменений (нарушенности) ландшафтов до начала строительства, например, железных дорог. Составляются прогнозы устойчивости ПТС в форме карт риска (технического, экзодинамического, экологического). По данным их анализа составляются программы наземных изысканий и режимных наблюдений.

В процессе строительства и при эксплуатации сооружений с помощью комплексирования ландшафтно-индикационного анализа материалов АКЗ с данными наземных экспресс-исследований с применением методов неразрушающего контроля сооружений оценивается динамика состояния взаимодействия природной и технической составляющих ПТС, на основе чего уточняются или корректируются прогнозы и обосновываются управляющие решения.

#### ***Банк данных по проблеме «Критические ситуации в состоянии ПТС в условиях природного разнообразия России»***

В ОАО «ЦНИИС» под руководством и при участии автора создан банк данных (БД), включающий в себя: (1) фрагменты наиболее типичных аэрокосмических (многозональных, инфракрасных, радиолокационных) снимков по выделению и обоснованию критических ситуаций (предаварийных, аварийных и поставарийных)

на инженерных сооружениях под действием опасных природных и природно-техногенных процессов; (2) аннотации к этим снимкам; (3) схемы их дешифрирования; (4) фрагменты специализированных прогнозно-оценочных карт, содержащих рекомендации по инженерной защите ПТС.

Этот банк данных разбит на ряд директорий: общую методическую, п-ов Ямал, Надым-Пур-Тазовское междуречье, Норильский регион, Черноморское побережье Кавказа, горные районы Северной Осетии, Приэльбрусье, северо-запад России, равнинный Алтай, Прибайкалье, Забайкалье, Дальний Восток. Ряд директорий выделяется по проблемам функционирования конкретных ПТС (коридор коммуникаций «Обская — Бованенково»; железная дорога Ягельная — Ямбург, зоны освоения ряда крупнейших нефтегазовых месторождений Тюменской области; береговой комплекс на участке Туапсе — Адлер; зона освоения БАМ; участок Западно-Сибирской железной дороги Барнаул — Бийск; железнодорожная магистраль Санкт-Петербург — Москва и др.).

В данном БД систематизируются и рассматриваются ситуации, связанные с кадастром, динамикой, состоянием ПТС, прогнозом аварий в состоянии трубопроводов, железных и автомобильных дорог, гидротехнических и промышленных сооружений, строящихся и эксплуатируемых в условиях интенсивного проявления природно-техногенных процессов.

Рассматриваемый БД положен в основу типизации предаварийных, аварийных и поставарийных ситуаций, возникающих при строительстве и эксплуатации сооружений в районах с экстремальными природными условиями. Частично материалы этого БД опубликованы в ряде монографий и учебных пособий и используются в учебном процессе при подготовке изыскателей и проектировщиков транспортных вузов [3, 6, 13–16].

#### ***Структура локальных геоинформационных систем в системе мониторинга ПТС***

Предлагаемая структура геоинформационных систем (ГИС) основана на результатах многолетних исследований, выполненных при создании конкретных линейных ПТС в различных ландшафтно-климатических и инженерно-геологических условиях России и стран СНГ. Это локальные ГИС для обоснования систем управления состоянием природно-технических систем, создаваемых и эксплуатируемых в сложных природных условиях, сопряженных с высоким риском воздействия на сооружения опасных природных процессов, которые базируются на трех уровнях информации (см. рис. 2), определяющих содержательную структуру и отражающих динамику состояния ПТС: (1) на базовой информации о ПТС, существующей до начала строительства; (2) на информации о ПТС, полученной в результате изысканий; (3) на оператив-



ной информации, полученной в процессе строительства и эксплуатации ПТС. Такой подход делает реальным своевременное предупреждение природно-техногенных аварий на всех стадиях создания и функционирования сооружений. Реальность предупреждения этих аварий обеспечивается:

- объективизацией информационной составляющей ГИС за счет использования данных аэрокосмического зондирования и наземных обследований, фиксирующих стадии и интенсивность проявления опасных природно-техногенных процессов;
- точностью машинной обработки вводимой информации;
- оперативностью получения видео- и картографической информации как для всей трассы, так и для любой ее точки в любом масштабе;
- надежностью хранения баз данных;
- оперативностью выдачи данных в любом виде (цифровом, графическом, картографическом, текстовом, на бумажной и на электронной основе);
- возможностью оперативного обновления, размножения и передачи информации на любое расстояние без потери качества.

Структура таких ГИС в соответствии со схемой, представленной на рис. 3, предусматривает следующие три взаимосвязанных блока, формирующих базу данных: (1) входящая информация; (2) электронные карты; (3) формирование оценок и прогнозов.

При формировании перечня задач, решаемых в системе предупреждения природно-техногенных аварий, данные ГИС изначально ориентируются на:

- решение задач локального характера;
- предупреждение природно-техногенных аварий и катастроф в сфере строительства и эксплуатации сооружений;
- обоснование управленческих решений по обеспечению технической и экологической безопасности ПТС в зонах их влияния на окружающую среду;
- создание регионально-отраслевого банка данных для обоснования проектных решений при строительстве в районах с аналогичными природными условиями.

Основу базы данных такой ГИС составляет автоматизированная картографическая система, формируемая на всех стадиях создания и эксплуатации ПТС. В качестве исходных данных для фор-

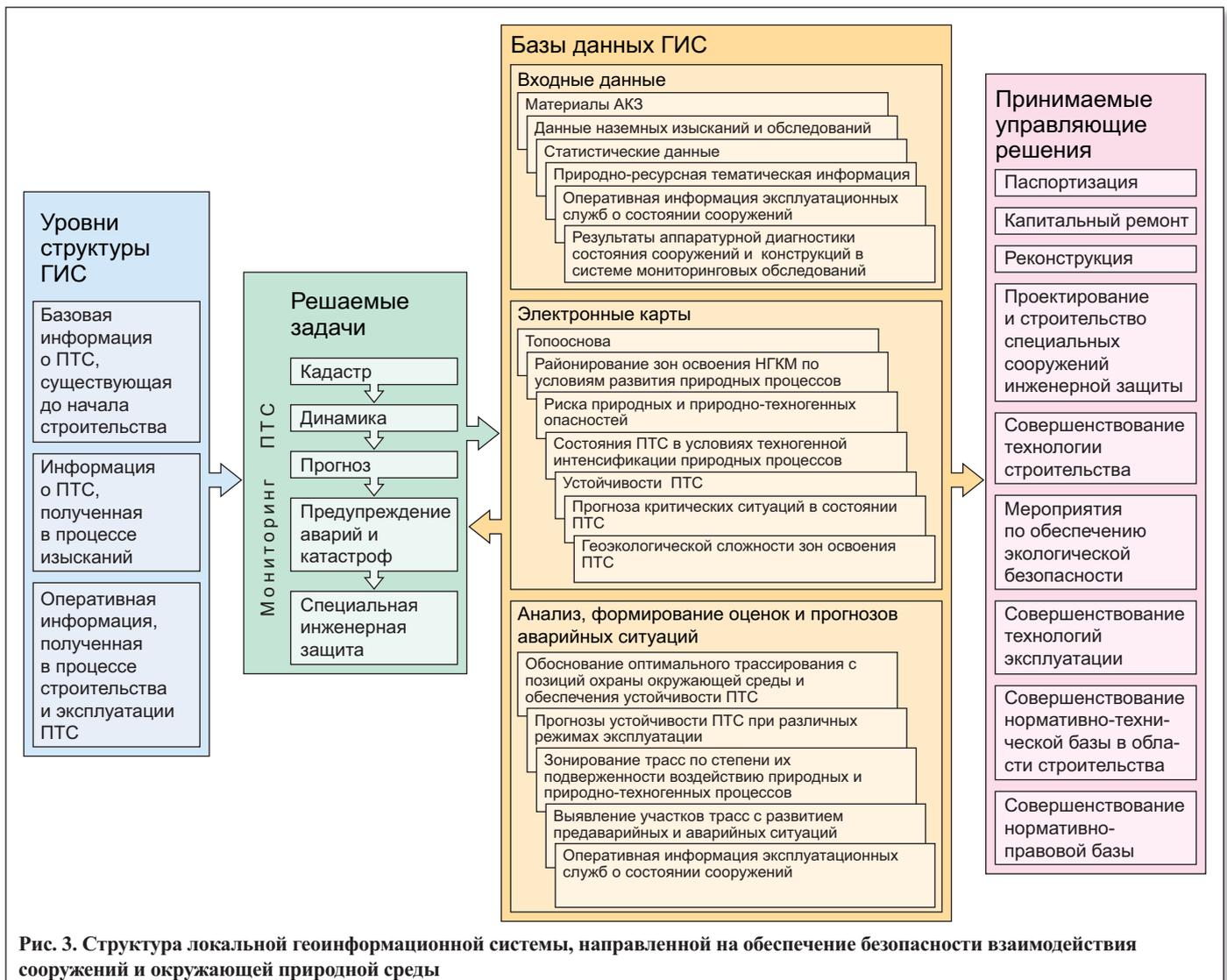


Рис. 3. Структура локальной геoinформационной системы, направленной на обеспечение безопасности взаимодействия сооружений и окружающей природной среды

мирования БД используется внешняя и внутримашинная информация.

Внешнюю информацию формируют:

- материалы АКЗ и результаты их дешифрирования;
- данные наземных изыскательских и специальных работ, в т.ч. выполняемых по системе мониторинга с применением методов неразрушающего контроля и диагностики состояния сооружений;
- статистические данные и природно-ресурсная информация, получаемые из федеральных и региональных государственных организаций;
- оперативная информация служб и подразделений организаций, осуществляющих строительство и эксплуатацию сооружений, об изменчивости состояния исследуемых сооружений и конструкций (данные об имевших место отказах, авариях, ущербе, принятых мерах инженерной защиты).

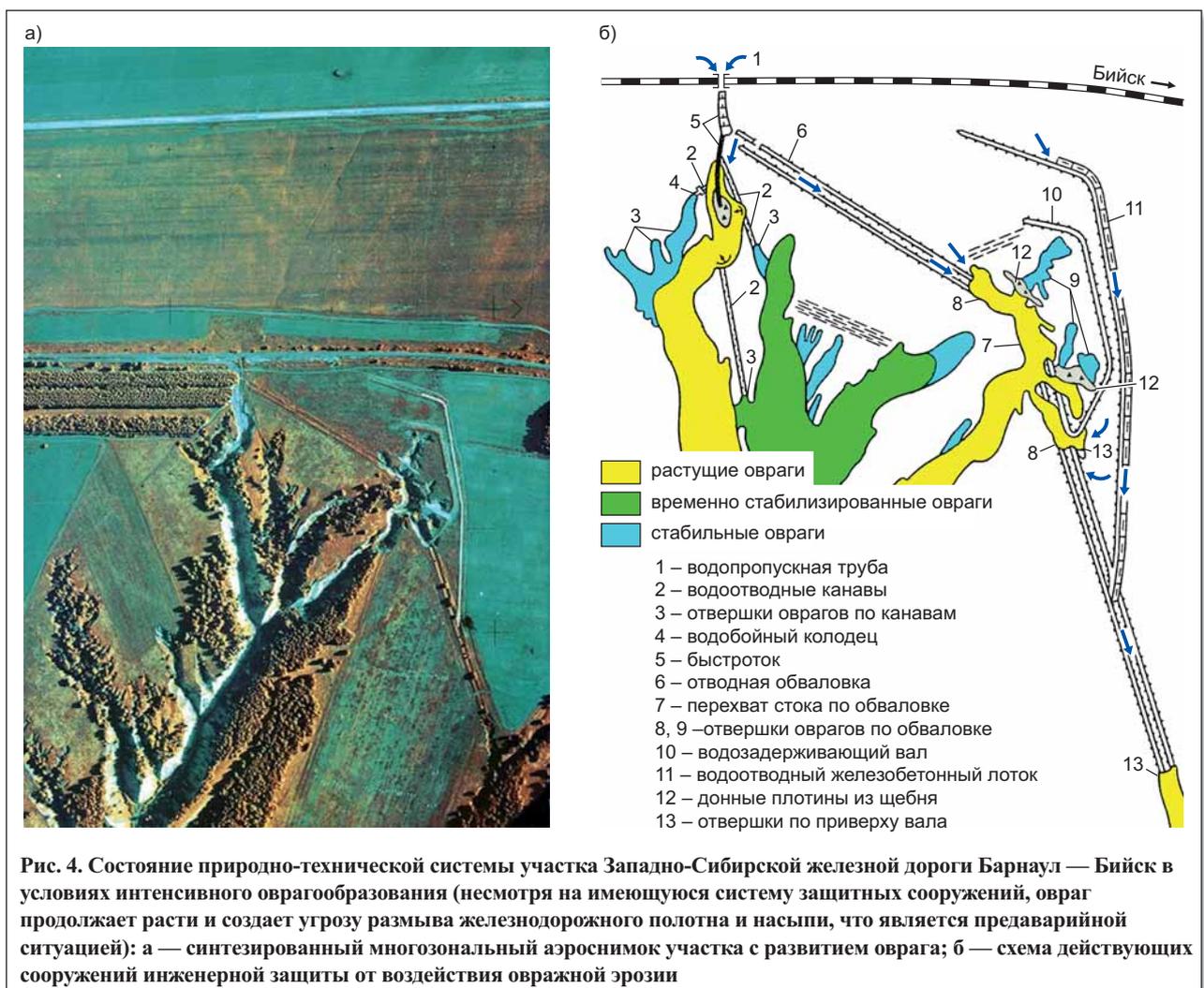
Внутримашинная информация включает в свой состав цифровые тематические карты, отражающие:

- топографо-геодезическую ситуацию района строительства или эксплуатации сооружения и ее изменчивость;
- техническое состояние исследуемых сооружений (наличие дефектов, деформаций, остаточ-

ный ресурс, уязвимость, безотказность, ремонтпригодность, коррозионную стойкость и т.п.);

- геоэкологическое и инженерно-геологическое состояние районов прокладки (пролегания) трасс (кадастр, динамику и интенсивность проявления опасных природных и природно-техногенных процессов, техногенную нарушенность ландшафтов, загрязненность, прогноз устойчивости ПТС);
- справочную информацию (государственные федеральные и региональные нормативные акты по экологии, землепользованию и строительству, правовому положению земель и их собственников);
- оценочную природно-ресурсную информацию (о пригодности земель для хозяйственного использования и их стоимости; об экологическом состоянии почв, поверхностных и подземных вод, грунтов, растительного покрова; о состоянии и боните лесных угодий; о биологических ресурсах и об имеющихся и потенциальных ущербах ПТС и окружающей среды).

Система автоматизированного картографирования включает семь типов постоянно обновляемых карт, позволяющих оценить состояние ПТС в любой точке трассы на всех этапах строительства и эксплуатации. Организация пространственной информации в ГИС рассматривается на

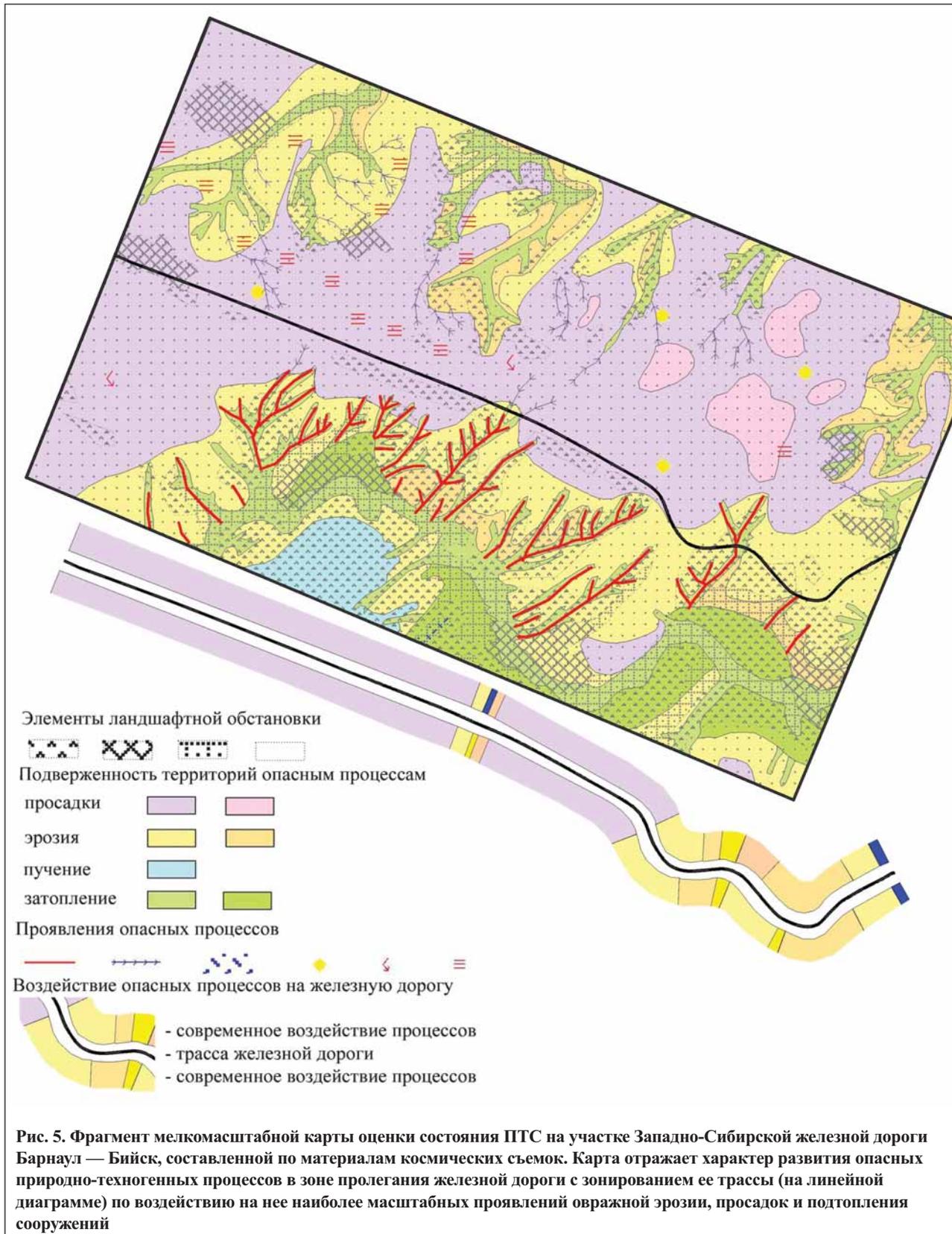




уровне создания многослойной модели картографической системы, содержащей слои по каждому компоненту организационной структуры природной и технической составляющих ПТС. Каждый слой имеет самостоятельное значение и может быть, в случае необходимости, выведен в виде отдельной аналитической карты для любой точки или отрезка трассы линейного сооружения (например, это может быть «Карта состояния тру-

бопровода на участке 132 км трассы»). С учетом послойной организации система автоматизированного картографирования может включать множество специальных карт без ограничения верхнего предела.

Вышеперечисленные свойства рассматриваемых ГИС значительно повышают обоснованность и качество управляющих инженерных решений по защите ПТС от воздействия опасных



природных и природно-техногенных процессов, снижают роль субъективных факторов в оценках и практически исключают ошибки в оценке состояния ПТС, связанные с недостатком информации о степени опасности развития указанных процессов.

При разработке подобной ГИС были использованы хорошо зарекомендовавшие себя во всем мире программные комплексы настольного типа, работающие под управлением операционной системы UNIX (в частности, MapInfo, а при больших объемах обработки данных — ARC/INFO в сочетании со специальной программой для обработки данных АКЗ ERDAS Imagine, имеющей модуль расширения Vector, обеспечивающий преемственность средств системы ARC/INFO, а через имеющиеся у нее расширения — и других родственных программных комплексов).

Данная ГИС была применена в системе мониторинга ПТС зон освоения ряда газоконденсатных месторождений (ГКМ) тюменского Севера (в т.ч. коммуникаций, входящих в их инфраструктуру), а также ряда железнодорожных магистралей (Октябрьской, Западно-Сибирской, Северо-Кавказской железных дорог) [6, 9, 13, 14, 16].

### Организация применения методов и технологий аэрокосмического зондирования при проведении мониторинга ПТС

Комплексность и своевременность применения аэрокосмического зондирования обеспечивают возможность его использования на всех стадиях строительства и инвестиционного цикла, начиная от обоснования схемы размещения объекта на местности и обоснования инвестиций в строительство до его эксплуатации, включая различные этапы проектно-изыскательских и строительных работ. Организация этих исследований осуществляется путем постановки и проведения комплексного мониторинга ПТС (см. таблицу).

Применение АКЗ с учетом указанных выше принципов значительно расширяет его возможности, выдвигая на первый план решение проблем безопасности функционирования ПТС.

На предпроектных стадиях использование геоэкологического анализа материалов АКЗ позволяет выявить барьерные зоны и принять инженерные решения, минимизирующие геодинамический (эндодинамический и экзодинамический), экологический и технические риски. Эти решения связаны с оптимизацией размещения сооружений

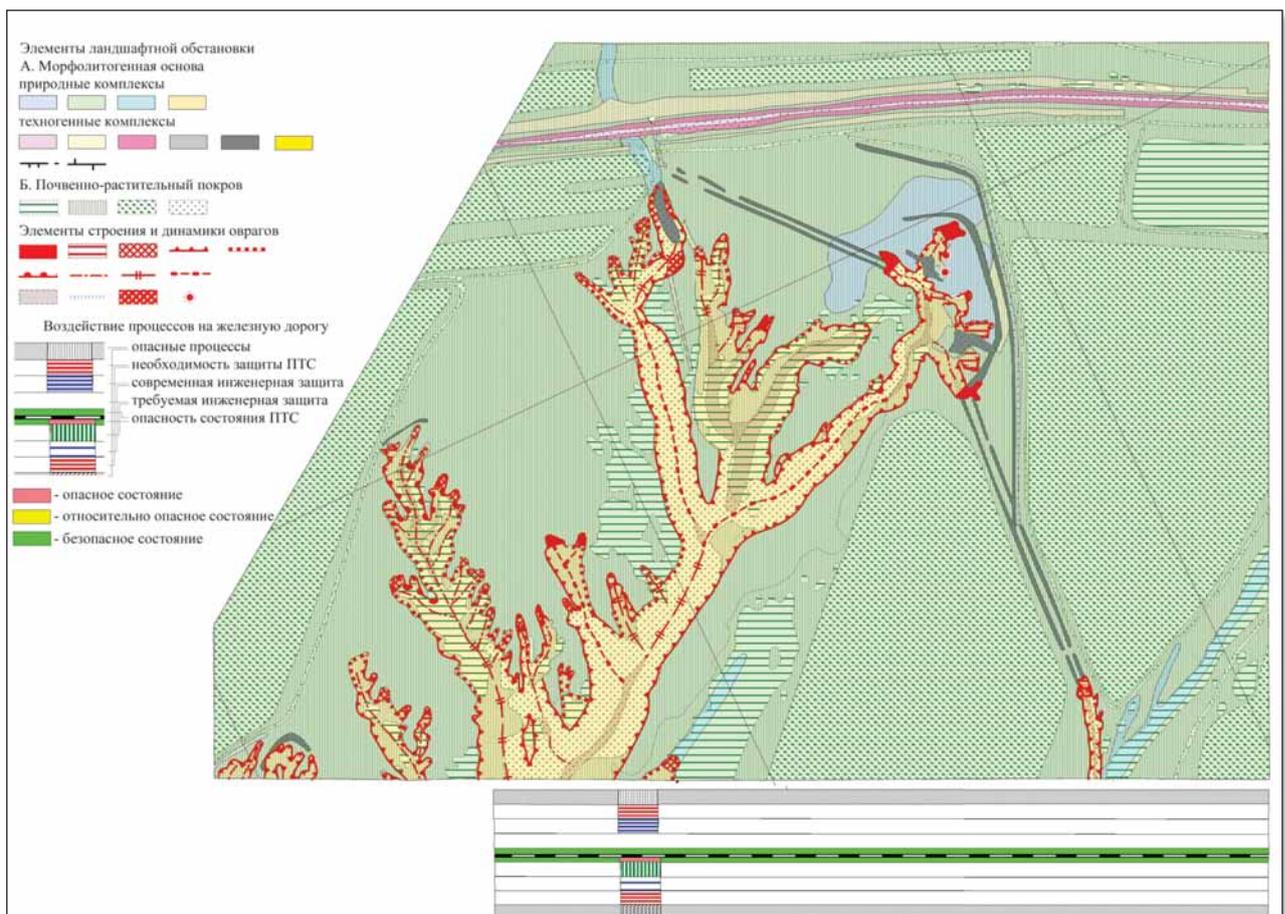


Рис. 6. Фрагмент крупномасштабной карты прогноза критических ситуаций в состоянии ПТС для отраженного на рис. 4 и 5 участка, составленной по данным дешифрирования материалов топографической аэрофотосъемки и наземных морфометрических измерений. На карте отражена эффективность действующей системы противозерозионной защиты на неустойчивом участке и даны рекомендации по ее совершенствованию с учетом закономерностей и тенденций развития овражной эрозии

Концептуальная схема мониторинга природно-технических систем		
Позиции, положенные в основу концепции мониторинга ПТС	Схематическое описание структуры исследований по оценке состояний ПТС	
Теоретические	1) «Статика» (состояние компонентов природной среды до начала строительства);	Основа базы данных ГИС
	2) «динамика» (изменения природной и технической составляющих ПТС в процессе строительства и эксплуатации сооружений под влиянием природных и техногенных факторов на период проведения обследований);	
	3) прогноз устойчивости ПТС;	
	4) выявление и типизация участков потенциальных критических ситуаций	
Методологические	1) Паспортизация объектов исследований (фиксация параметров природных и технических компонентов объектов исследований до начала строительства);	
	2) режимные исследования ПТС;	
	3) моделирование состояний ПТС;	
	4) управляющие инженерные решения	
Технологические	1) Аэрокосмическое зондирование;	
	2) наземные экспресс-исследования по оценке параметров природной составляющей ПТС;	
	3) аппаратная диагностика состояния инженерных сооружений методами неразрушающего контроля;	
	4) автоматизированное картографирование состояний ПТС; управляющие решения.	

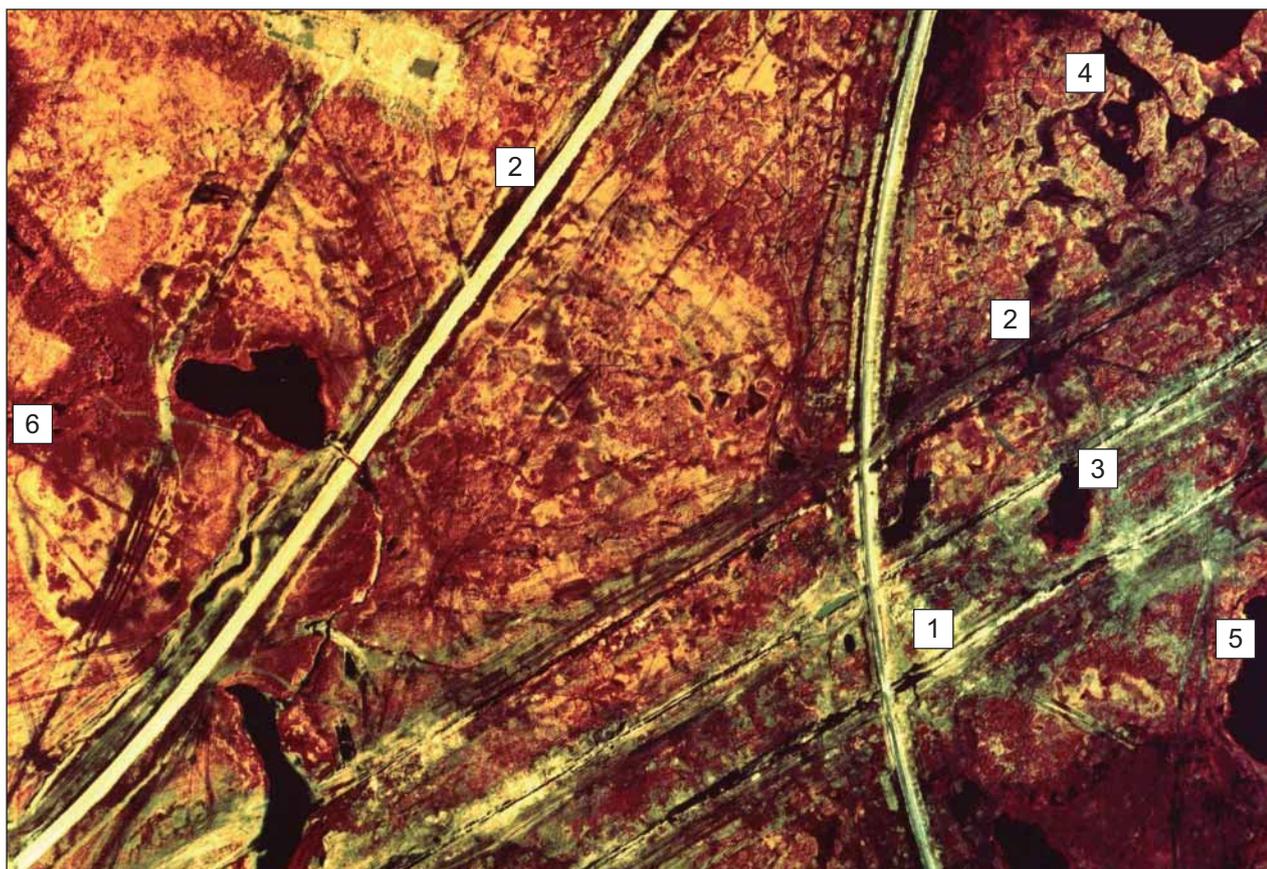


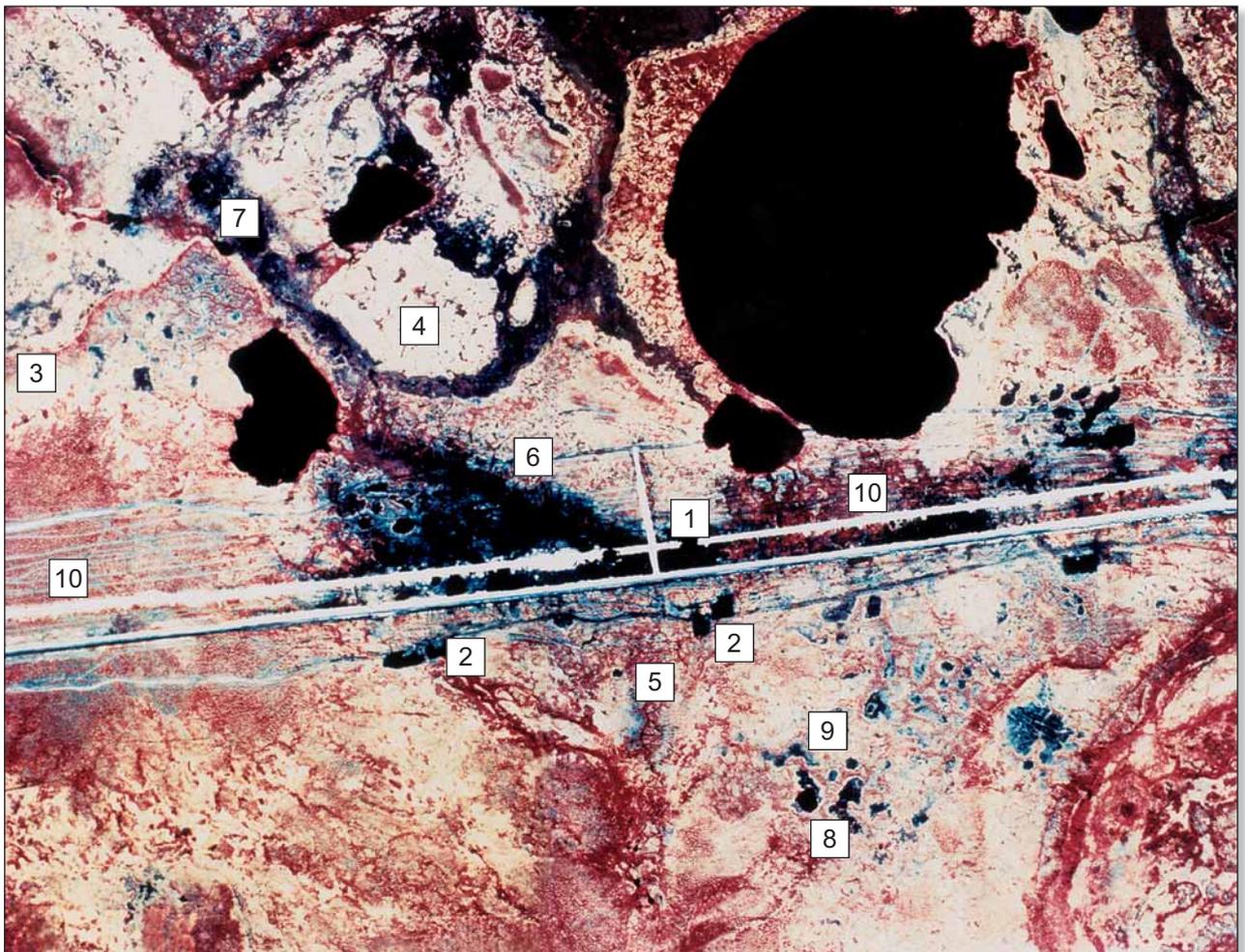
Рис. 7. Фрагмент многозонального аэроснимка участка пересечения трехниточного газопровода «Ямбург — Ныда» с железной и автомобильной дорогами. Снимок фиксирует предаварийную ситуацию, связанную с резкой активизацией мерзлотных процессов и подтопления насыпи в результате нарушения строительных технологий. В результате активизации пучения мерзлых грунтов вдоль трубопровода, проложенного в основании железнодорожной насыпи, и активного термокарста произошло выпучивание и всплытие гильз трубопровода с нарушением его гидроизоляции и подтопление насыпи. Данная ситуация классифицируется как предаварийная, строительство трубопровода остановлено для перепроектирования на участках его пересечения с дорожными сооружениями: 1 — песчаные раздувы; 2 — зоны подтопления и обводнения; 3, 4 — развивающийся и угнетенный термокарст соответственно; 5 — полосы прибрежной растительности; 6 — дренируемые участки с растительностью

и обоснования выбора их конструктивно-технологических решений, в т.ч. по их инженерной защите от воздействий опасных природных и природно-техногенных процессов.

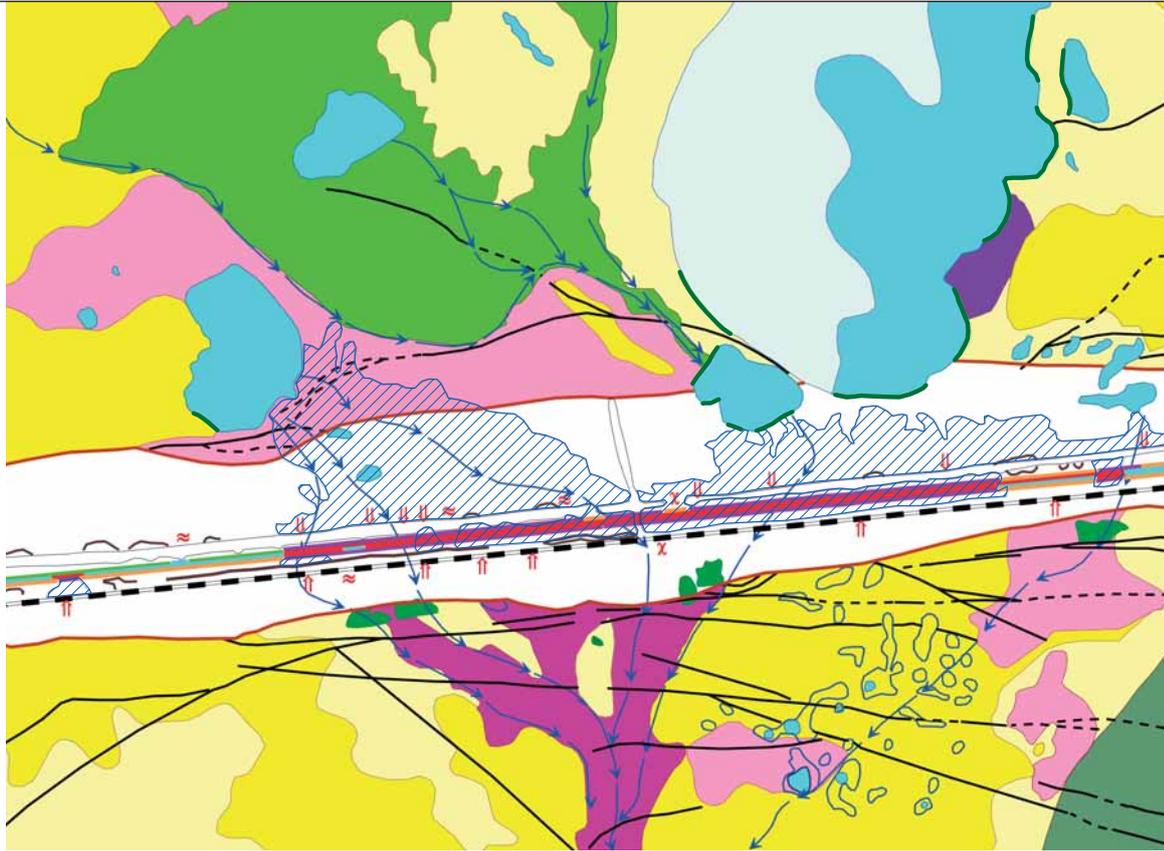
На стадиях строительства и эксплуатации сооружений применение материалов АКЗ обеспечивает выявление предаварийных ситуаций, связанных с активизацией опасных природно-техногенных процессов (оползней, обвалов, в т.ч. сейсмогравитационных, селей, лавин, карста, мерзлотных процессов, заболачивания в основании сооружений, их подтопления и просадок, волновой абразии), которые возникают в результате нарушения строительных технологий. Это в ряде случаев позволяет откорректировать технологические регламенты и уточнить инженерные решения по защите: оснований и насыпей — от размыва и деформаций; трубопроводов — от всплытия, нарушения гидроизоляции, отклонения их продольного профиля от проектного положения; гидротехнических сооружений — от размыва. В комплексе это позволяет предупреждать возникновение деформаций сооружений, взрывов, пожаров, загрязнения атмосферы, почв, грунтов,

поверхностных и подземных вод, истощения рекреационных ресурсов.

Проектировщики и строители могут использовать специальные карты, составляемые в рамках локальных ГИС, для разработки и корректировки управляющих инженерных решений, направленных на обеспечение безопасности создаваемых и эксплуатируемых сооружений и окружающей среды, что подтверждается экспериментальной практикой. Например, при проведении мониторинга ПТС железнодорожных линий Обская — Бованенково на полуострове Ямал и Ягельная — Ямбург в Надым-Пур-Тазовском междуречье по результатам данных АКЗ назначались мероприятия по инженерной защите сооружений от размыва (обустройство водопропускных труб в теле насыпи, дополнительный дренаж, увеличение высоты насыпи) (рис. 8, 9); при проведении мониторинга ПТС участка Западно-Сибирской железной дороги Барнаул — Бийск по результатам АКЗ назначались дополнительные противоэрозионные мероприятия (рис. 4–6). Примеров подобного рода достаточно много, даже имели место случаи останки строительства с целью перепроектирования



**Рис. 8.** Фрагмент многозонального аэроснимка участка строительства железной дороги Ягельная — Ямбург. В результате активизации мерзлотных процессов в связи с отсутствием в проекте водопропускных сооружений произошли подтопление насыпи притрассовой автомобильной дороги и ее размыв (аварийная ситуация): 1 — зоны обводнения; 2 — вновь образовавшиеся озера; 3 — граница древнего хасырея; 5 — стабилизировавшееся состояние; 6 — активное состояние; 7–9 — этапы развития термокарста: 7 — ранний, 8 — зрелый; 9 — угнетенный; 10 — зоны нарушенных ландшафтов



## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

**Ненарушенные ландшафты**

Поверхности тундры:

- Слабодренированные с пятнами-медальонами
- Дренированные мелкаячеистые
- С полигональным строением
- Хасыреи молодые
- Хасыреи древние
- Озера
- Мелководные участки
- Фрагменты озерной поймы
- Полосы разнотравно-осоковой обводненной растительности

**Нарушенные ландшафты**

- Спущенные озера

Ландшафты, образовавшиеся в связи с перекрытием поверхностного стока на месте плоских субволнистых поверхностей тундры:

- Зоны сильного нарушения почвенно-растительного покрова вдоль насыпей
- Со стороны стока – зоны подтопления и обводнения
- С противоположной стороны – тундры полигональные сухие с развитием кустарничковой растительности по бывшим ложбинам стока – зоны осушения
- Направления естественного стока

**Техногенные объекты**

- Колея железной дороги
- Грунтовая дорога, технологические переемы между насыпями
- Вездеходные следы сухие
- Вездеходные следы обводненные
- Участки свалок строительного мусора в местах сооружения насыпей
- Обводненные котлованы

**Устойчивость насыпей**

- Неустойчивые. Насыпь участками полностью или частично размыта, сильно подтоплена, подвержена активировавшемуся термокарсту (глубина термокарстовых озер до 1,7 м)
- Относительно устойчивые. Насыпь под угрозой подтопления, подвержена активировавшемуся термокарсту (глубина термокарстовых озер до 1,0 м)
- Устойчивые. Насыпь расположена на сухой дренированной поверхности вне зоны активизации мерзлотных процессов

Прогноз критических ситуаций в состоянии насыпей:

- Деформации насыпи в результате подтопления
- Вертикальные деформации
- Прорыв насыпи

**Назначение защитных мероприятий по обеспечению равновесного состояния ПТС**

- Обустройство водопропускных труб в теле насыпи
- Подсыпка и укрепление насыпи

**Рис. 9. Фрагмент карты прогноза критических ситуаций в состоянии ПТС железной дороги Ягельная — Ямбург, составленной по данным дешифрирования аэроснимков (см. рис. 8). На карте отражено состояние основания и земляного полотна железной дороги в условиях интенсивного проявления просадок и подтопления. Оконтурены участки, подверженные воздействию этих процессов, количественно оценены характер и величины деформаций земляного полотна, оконтурены участки размывов, даны рекомендации по размещению водопропускных труб, дренажным мероприятиям, увеличению высоты насыпей**

железнодорожных сооружений, в частности на ряде участков железнодорожной линии Ягельная — Ямбург, где на участках пересечения железнодорожной насыпи и подземного газопровода в результате нарушения строительных технологий развивались взрывоопасные ситуации, связанные с активизацией мерзлотных процессов (рис. 7).

## Выводы

1. В структуре информационного обоснования управляющих решений при проектировании, строительстве и эксплуатации ПТС особую роль играет аэрокосмическое зондирование, которое дает возможность решать задачи, объединяемые понятием «экологическая безопасность», через дистанционный анализ оптических моделей природно-территориальных комплексов, формирующихся по материалам АКЗ. Это обеспечивается с помощью изучения и анализа многообразных прямых и косвенных форм проявления опасных природных и природно-техногенных процессов, возникающих в результате взаимодействия природных факторов с сооружениями на разных стадиях их создания и функционирования, и оценки степени уязвимости самих сооружений. Ни один другой метод исследований не позволяет решать эти задачи в более короткие сроки с разной степенью полноты и детальности, требуемой для обоснования управляющих решений при создании и обеспечении функционирования ПТС большой протяженности.

2. Наиболее эффективным организационно-техническим мероприятием, всецело определяющим реализацию возможностей АКЗ при предупреждении аварий и катастроф в ПТС на всех стадиях и этапах создания и функционирования сооружений, является именно мониторинг ПТС, осуществляемый комплексно и в геотехническом, и в геоэкологическом направлениях, а не компонентно-отраслевой мониторинг состояния инженерных сооружений или природной среды. Однако, хотя мониторинг ПТС и является организационной формой реализации системы обеспечения безопасности и даже регламентирован государственными нормативными документами в строительстве, он до сих пор не осуществляется на локальном уровне конкретных ПТС (именно ПТС, а не биосферы, геологической среды, водных ресурсов или сооружений) и не финансируется, несмотря на продолжающееся нарастание количества и тяжести аварий и катастроф.

3. Мониторинг протяженных линейных ПТС, создаваемых и функционирующих в сложных ландшафтно-климатических и инженерно-геологических условиях с интенсивным развитием опасных природных процессов, выполняемый без применения аэрокосмических технологий, не может претендовать на получение данных о состоянии ПТС, достаточных по достоверности и полноте для обеспечения комплексной (технической, экологической и социальной) безопасности. ❄

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г.К. Природно-технические системы и их мониторинг // Инженерная геология. 1990. № 5. С. 3–9.
2. Бондарик Г.К., Чан Мань Л., Ярз Л.А. Научные основы и методика организации мониторинга крупных городов. М.: ПНИИИС, 2009. 260 с.
3. Грицьук В.И., Ревзон А.Л. Аэрокосмическая геоинформация для проектирования, строительства и реконструкции железных дорог: иллюстрированное учебное пособие. М.: Изд-во ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 79 с.
4. Епишин В.К., Трофимов В.Т. Литомониторинг — система контроля и управления геологической средой // Теоретические основы инженерной геологии. Социально-экономические основы. М.: Недра, 1985. С. 243–250.
5. Измалков В.И., Измалков А.В. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском. СПб.: Изд-во НИЦЭБ РАН, 1998. 482 с.
6. Камышев А.П. Методы и технологии мониторинга природно-технических систем Севера Западной Сибири / под ред. А.Л. Ревзона. М.: Изд-во ОАО «ВНИПИГаздобыча». 1999, 30 с.
7. Королев В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем / под ред. В.Т. Трофимова. М.: КДУ, 2007. 416 с.
8. Королев В.А. Мониторинг геологической среды: учебник / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 1995. 272 с.
9. Котляков В.М., Грачев В.А., Ревзон А.Л. и др. Аэрокосмический аспект в изучении взаимодействия природы и сооружений // Экология урбанизированных территорий. 2006. № 3. С. 73–83.
10. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ПНИИИС, 2009. 236 с.
11. Ревзон А.Л. Аэрокосмические исследования в строительстве // Природа. 1989. № 10. С. 57–64.
12. Ревзон А.Л. Аэрокосмический мониторинг изменений геологической среды при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений // Материалы 1-й Всесоюзной конференции «Биосфера и климат по данным космических исследований». Баку, 1982. С. 135–137.
13. Ревзон А.Л., Камышев А.П. Природа и сооружения в критических ситуациях. Дистанционный анализ. М.: Триада Лтд, 2001. 208 с.
14. Ревзон А.Л. Картографирование состояний геотехнических систем. М.: Недра, 1992. 223 с.
15. Ревзон А.Л. Космическая фотосъемка в транспортном строительстве. М.: Транспорт, 1993. 276 с.
16. Ревзон А.Л., Шварев С.В. ГИС-технологии в системе предупреждения аварий на железных дорогах в условиях интенсивной эрозионной опасности // Экология и промышленность России. 2005. № 12. С. 27–31.
17. Садов А.В., Ревзон А.Л. Аэрокосмические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 223 с.
18. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой РФ, 1997. 41 с.
19. СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. М.: Госстрой РФ, 1997. 41 с.
20. Цернант А.А. Экосистемный подход к управлению качеством природно-технических систем // Материалы 2-й Всесоюзной школы-семинара «Актуальные проблемы оптимизации конструкций». Владимир — Суздаль, 1990. С. 62–66.