

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### ГЕОВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2013 г. А. И. Рюмкин\*, Е. С. Тябаев

*Томский национальный исследовательский государственный университет, Томск*

*ООО НПО “Сибгеоинформатика”, Томск*

*\*E-mail: airyumkin@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2012 г.

Исследуется применимость метода визуализации в создании трехмерных геоинформационных систем (ГИС) на базе моделей рельефа и данных дистанционного зондирования Земли для обоснования проектных решений ранних стадий проектирования магистральных трубопроводов. В практических задачах выполнения работ предпроектной стадии для сибирских трубопроводов проведена разработка цифровых моделей рельефа (ЦМР), определены варианты покрытий трассы снимками разного масштаба, разрешения и особенности построения триангуляции для ЦМР. Проведен пространственный анализ трассировки трубопровода с учетом существующего описания природных ресурсов, объектов застройки, инженерных коммуникаций и ограничений в виде границ памятников природы и культурного наследия. Показано, что важнейшее значение при уточнении вариантов трассирования на ответственных участках имеют методы геовизуализации, позволяющие интегрировать при компьютерной поддержке сильнейшие способности специалистов и возможности ГИС в обработке геоизображений. На реальных примерах показана существенная полезность методов геовизуализации при создании информационных технологий поддержки проектных решений по проектированию магистральных трубопроводов. Создаваемые при этом системы, ЦМР и базы данных пригодны для организации в последующем мониторинга процессов строительства и эксплуатации трубопровода.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, геовизуализация, магистральные трубопроводы, модели рельефа, проектирование

**DOI:** 10.7868/S0205961413050060

#### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной статьи определяется недостаточной разработанностью нефтегазовых приложений дистанционного зондирования (ДЗ) (Бондур, 2010; Земля из космоса, 2011; Аэрокосмический мониторинг объектов..., 2012). В ряде задач мониторинга и развития нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса достаточно очевидна перспективность применения аэрокосмических методов. Особенно эффективны они на ранних стадиях проектирования (Коршак, Нечваль, 2008) и в процессе эксплуатации (Кутуков, 2002), в условиях информационной недостаточности при минимальном объеме полевых инженерных изысканий, производимых лишь для особо сложных условий трассы. Необходимы тщательное исследование различных аспектов их применения для реальных ситуаций и возможность их доведения до практических технологий. В данной работе приведено описание соответствующего

исследования применимости геоинформационных систем (ГИС) и ДЗ для ранних стадий разработки проектной документации, проведенных нами ранее в интересах ООО “Газпром-трансгаз-Томск” и ведущих проектных институтов ОАО “Газпром” для новых трасс в Сибири. Изложение иллюстрируется реальными примерами из практики проектирования магистральных трубопроводов (МТП).

Работ с описанием применения ГИС и ДЗ для проектирования газо- и нефтепроводов довольно много (Артемов, Артемова, 2001; Коршак, Нечваль, 2008; Корсей и др., 2003; Ишук 2005; Balogun et al., 2012; Delevar, Naghibi, 2003; Yildirim, 2006). Большая их часть посвящена приложениям ГИС для картирования трассы на основе построения цифровых моделей местности (ЦММ), цифровых моделей рельефа (ЦМР), пространственного анализа и геокомпьютинга. В ряде случаев проводится оптимизация решений, вычисляются области последствий разливов и т.п.

В то же время известно, что в реальности проектная документация (и карты, в нее входящие) являются результатом довольно сложного коллективного процесса, многоуровневого, с взаимодействием представителей различных специальностей (по инженерной геологии, геологии углеводородов, землеустроителей, трубопроводчиков и др.), с неоднократным возвратом на сложные участки и пр. В нем, конечно, используются результаты вычислений на основе ГИС, но необходимо применение технологий, интегрирующих возможности опытных специалистов и специфические возможности компьютеров. По нашему мнению, в качестве такой интегрирующей технологии следует использовать трехмерные ГИС с развитыми средствами визуализации пространственных данных, или гео-визуализации (Andrienko, 2010; Balogun et al., 2011, Bodum, 2005; Kjems, 2004; Nielsen, 2004).

### РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование трубопроводов сейчас производится в две основных стадии – предпроектной и разработки проектной документации. Вначале выполняются предпроектные работы, ранее относившиеся к технико-экономическому обоснованию (ТЭО) (Дерцакян и др., 1977), в состав которых входят этапы подготовки декларации о намерениях (ДОН) и обоснование инвестиций (ОИ) (Коршак, Нечваль, 2008).

ДОН содержит предварительные проектные решения по выбору конкурирующих вариантов трассы и площадок размещения оборудования в рамках существующих природных и техногенных условий и выявленных ограничений для предварительного согласования органами государственной власти РФ и ее субъектов. При этом определяются также ориентировочная потребность в основных ресурсах (прежде всего земельных, водных, энергетических) и стоимость строительства по аналогам и укрупненным показателям с учетом возможных затрат на инженерную защиту объекта от опасных природных и техноприродных процессов.

При положительном заключении на ДОН осуществляется переход к этапу обоснования инвестиций с некоторой детализацией условий реализации, включая технические решения по выбору генерального направления трассы, переходов через естественные и искусственные преграды, разработке раздела “Оценка воздействия на окружающую среду” (ОВОС). Уточняется стоимость строительства нефтепровода в выбранном районе с учетом стоимости сооружений по трассе и производится согласование его местоположения на общественных слушаниях с местными органами власти, где ГИС и данные ДЗ очень выигрышны.

Предпроектная документация разрабатывается с учетом решений, принятых в программах пространственного планирования и схемах раз-

вития регионов с целью оценки возможностей инвестирования в выбранном районе, и передается на госэкспертизу.

Проектирование осуществляется на основе информационных материалов, характеризующих регион проектирования и представленных камеральными данными и данными полевых изысканий. При этом важнейшее значение для характеристики реальных условий окружающей среды имеют данные инженерных изысканий. Задачей инженерных изысканий являются комплексное изучение природных и техногенных условий территории (региона, района, трассы, площадки, участка) объектов строительства, составление прогнозов взаимодействия этих объектов с окружающей средой, обоснование их инженерной защиты и безопасных условий жизни населения (СНиП 11-02-96, п. 4.1). В их структуре выделяются геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические, инженерно-экологические изыскания. Состав и объем изысканий детализируется соответственно стадиям проектного процесса и регламентируется соответствующими нормативными документами (СНиП 11-02-96; РД, 2002; СП, 2011).

В составе изысканий значительное место занимают картографические материалы в виде топографических карт нужных масштабов, тематических карт, материалы аэро- и космосъемки. Практически все они требуют пространственной привязки, совмещения разномасштабных геоизображений, их обработки (общей, первичной и специальной, включая классификацию и создание векторных ЦММ для последующего ГИС-анализа).

Отметим, что нормативами на этапах ДОН и ОИ предусматриваются сбор и анализ картографических материалов и других геоизображений, в том числе аэро- и космоснимков, сбор сведений о месторождениях полезных ископаемых, границах застройки, в т.ч. проектируемых или перспективных трасс инженерных коммуникаций, участках сельхозугодий, орошаемых и осушаемых землях, границах заповедников, территориях с особым статусом. На особо сложные участки обычно выполняется детализированная топографическая съемка. Это участки в горной местности, переходы через автомобильные и железные дороги, болота, речные переходы. Для инженерно-экологические изысканий предполагаются сбор и анализ мелко- и среднемасштабных карт и схем ландшафтного районирования, кадастровых, почвенных, геоботанических, материалов Госгеолфонда. При этом рекомендации по обработке и детальность исходных данных регламентированы только для выполнения инженерно-экологических работ (дешифрирование разномасштабных аэро- и космоснимков (АКС) М 1 : 200 000–1 : 125 000, с увеличением до М 1 : 20 000–1 : 25 000 (РД, 2002)).

Практически все эти данные могут быть введены в ЭВМ и обработаны программно на ГИС и системах обработки аэрокосмических изображений.

С учетом данных изысканий принимаются проектные решения по выбору трассы, размещению промежуточного оборудования, проводятся предварительные гидравлические расчеты. Общая оценка качества проекта осуществляется по значениям критериев. В качестве общих критериев рассматриваются обычно (Коршак, Нечваль, 2008) объем металлоложений, длительность проекта, объем затрат на строительство и последующую эксплуатацию трубопровода (ТП), как основной. Оптимизация достигается при минимуме значений критериев, которым соответствуют кратчайший вариант трассы (минимум металлоложений), минимальный срок выполнения, минимум затрат. В реальности наиболее адекватен вариант многокритериальности, как и в большинстве других задач проектирования (САПР).

На стоимость единицы длины трубопровода влияют такие факторы, как диаметр труб, давление, природные условия, экономико-географические факторы (местоположение, относительное размещение (обжитые районы, наличие ж.д. и автодорог), тяготение к коридорам коммуникаций, выбор схем укладки и сооружения, расстановка и выбор мест для оборудования. Резкое удорожание происходит в горах. Для учета влияния местности на характеристики трасс вводится набор категорий местности. Так, в (Коршак, Нечваль, 2008) указано на 79 категорий, различающихся условиями строительства и стоимостью (грунт песчаный, плавунный, переходы, орошаемые земли и др.). Каждой из категорий соответствует набор полигонов, пересечение которых коридором трассы определяет длину соответствующего участка и площадь использованных земель. Например, из опасных геологических процессов и явлений по трассе газопровода в республики Алтай, длиной в 589 км, присутствуют: обвалы и осыпи (67 км, 11.4% всей длины), заболоченность (27 км, 4.6%), участки морозного пучения (33 км, 5.6%), овражно-балочная эрозия (42.5 км, 7.2%), наледи (30 км, 5.1%), оползни (26 км, 4.4%), лавины (21 км, 3.6%), термокарст (13.5 км, 2.3%), курумы (12 км, 2%).

Оптимальная трасса при этом определяется программно при вычислении возможных вариантов трасс и сравнении их стоимостей и значений других критериев.

Исторически компьютеризация проектных решений развивалась, начиная с попыток оптимизации выбора трассы на основе специальных моделей местности и рельефа (Бородавкин, 1974; Дерцакян, 1977) с постепенным усложнением модели местности за счет учета разнообразных удорожающих факторов, — таких, как наличие мерзлоты, заболоченности, крепости грунтов, лавиноопасно-

сти и пр. (Коршак, Нечваль, 2008). Позднее, в связи с распространением импортных ГИС, в обиход вошли зарубежные методы оптимизации трассирования на основе критериев типа *least cost pathway* (Delevar et al., 2003; Yildirim, 2006; Корсей и др., 2003; Рыльский, 2004; Ишук, 2005). Пожалуй, наиболее полно такой подход реализован в работе (Корсей и др., 2003), в которой удорожание по каждому фактору для всей территории региона отражено с помощью модели GRID, заданной на целочисленной решетке  $(i, j)$ , которая позволяет наглядно представить поля их значений для территории в виде

$$X^k = \{x_{i,j}^k\},$$

где  $X^k$  — множество значений  $k$ -го фактора,  $x_{i,j}^k$  — значение  $k$ -го фактора в позиции  $(i, j)$ .

С помощью весовых коэффициентов  $b_k$  локальное влияние таких факторов на однородных GRID моделях территории может быть приведено к значению общей стоимости

$$S = \sum_k S^k = \sum_{i,j \in A} b_k^* x_{i,j}^k,$$

где  $A$  — область определения значений факторов, представленная целочисленной решеткой GRID моделей. Оптимальная трасса вычисляется средствами CostPath модуля Spatial Analyst ГИС ArcView, обеспечивая  $l^s = \min \arg S(l)$ , где  $l = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n)$  — последовательность точек, задающих трассу трубопровода на целочисленной решетке,  $p_i = p_i(i, j)$ , где  $(i, j) \in A$ .

Развитие ГИС и систем обработки данных ДЗ приводит к отходу от пакетного режима в сторону интерактивных программ, создания картографической поддержки на базе ГИС, пространственного анализа данных, к интерактивному выбору трасс с учетом расчетов на ЦММ с ограничениями, оптимизации трассы по стоимости с учетом удорожающих факторов (Корсей и др., 2003; Ишук, 2005), минимизации рисков (Balogun et al., 2012), подбору вариантов на локальных участках. При этом промежуточные и полные расчеты сопоставляются по значениям локальных характеристик расчетных трасс, — таких, как углы наклона, крепость грунтов, транспортная доступность и т.п.

В современных системах пространственного планирования широко используется машинная графика и геовизуализация для повышения адекватности проектного процесса (Andrienko, 2010; Batty, 2011). Перспективно также применение систем поддержки коллективной разработки и принятия решений (Geovisualization, 2001). В недавних работах по трубопроводам (Balogun et al., 2012; He, 2011) рассматриваются 3D-ГИС с геовизуализацией, но, однако, лишь для показа взаимного положения труб относительно других эле-

ментов окружающей среды. В работе (Артемов, Артемова, 2001) визуализация используется для выбора трассы при сложном рельефе, но без описания смежных задач, решаемых при проектировании. Почти не описаны ключевые моменты построения ЦММ с особенностями территории. Нами ранее на основе предварительного анализа материалов изысканий, исходных геоизображений для их построения, практики проектирования представлена концепция создания качественных ГИС, пригодных для предпроектного анализа вариантов технических решений (Рюмкин, 2010).

Функции геовизуализации весьма полезны при предварительном выборе трассы на основе материалов “драпировки рельефа” космоснимками и получением наглядного представления ситуации на основе 3D GIS с организацией соответствующих виртуальных просмотров. Близкие ситуации возникают и при согласовании обходов (облетов) участков с памятниками истории, культуры, охраняемыми природными объектами.

В заключение отметим, что задачи проектирования магистральных трубопроводов оказывают существенное влияние на региональную инфраструктуру и должны выполняться с учетом программ территориального (пространственного) планирования и схем развития регионов. Такое сопоставление и согласование также может быть эффективно выполнено с помощью ГИС и данных ДЗ (Рюмкин, Чумичев, 1998; Рюмкин, Кравченко, 2007) за счет обмена ЦММ принятых форматов, что дает возможность реализации схем электронного правительства.

### АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ

Как было показано ранее, при проектировании магистральных трубопроводов в сложных природных условиях большое значение для эффективной организации проектирования, анализа вариантов проектных решений и проведения проектных расчетов имеет адекватное представление пространственных данных о территории, рельефе, визуальная информация о свойствах ландшафтов и характеристиках окружающей среды.

Исходя из анализа содержательных задач проектирования и потребностей проектного процесса, как в данных изысканий, так и в наличии программного обеспечения необходимой функциональности можно определить состав данных и операций их обработки.

Для информационной поддержки проектирования нормативно определены данные изысканий и результаты их обработки (СНиП 11-02-96; РД, 2002; СП, 2011), многие из которых могут быть получены с помощью данных ДЗ. На их базе попутно могут быть решены задачи актуализация фото- и картографических материалов, в т.ч. формирование ортофото, обновление карт соответ-

ствующих масштабов на основе дешифрирования, выполняемого вручную и с помощью классификации, метода распознавания образов (Земля из космоса, 2011; Протасов, Рюмкин, 2002; Kabanov et al., 1999). Для этого необходимы радиометрическая и спектральная коррекция, совмещение и пространственная привязка геоданных разного происхождения, совместная обработка разномасштабных изображений, — т.е. требуются полноценная обработка изображений (для улучшения исходных снимков) и специальная обработка аэро- и космоснимков.

Нужны также процедуры геоинформационного анализа: пространственный анализ пересечений, наложений, расстояний, анализ рельефа, раскраска, расчет буферных зон, покрытий, перекрытий, пересечений (Рюмкин, 2002). Для поддержки процедур геовизуализации нужны возможности формирования специальных аналитических методов и тематических легенд (Andrienko, 2010), осмотра объектов с разных точек, наезда, пролета, формирование демороликов.

Как известно (Брауде, 2004), стандарты проектирования программных систем предполагают обязательный свод требований к ним, предшествующий последующим этапам процесса разработки. При анализе решаемых задач естественным образом выделяется ряд таких требований, на основе которых необходимо обеспечить выполнение набора функций, организацию интерфейса, определить структуру баз данных и архитектуру системы.

Общие требования к системе по функциональности:

- возможность представления и обработки изображений для улучшения качества исходных снимков важных участков местности и последующей обработки и анализа;
- представление поверхности с помощью ЦММ и ЦМР с регулярной и нерегулярной сетью высот, наложения на ЦМР космических снимков, векторных слоев ГИС и объектов трасс;
- географическая координатная привязка моделируемых данных;
- полное интерактивное управление трехмерной визуализацией, включая задание маршрута перемещения (пролета) над местностью, выбор произвольных точек обзора;
- пространственный анализ (расчет буферных зон, покрытий, перекрытий, пересечений);
- возможность работы с непрерывным географическим пространством с динамической подкачкой необходимых листов ЦМР, ЦММ, изображений;
- развитые возможности обмена (импорт, экспорт) геоданных.

Организация интерфейса и навигации:

- управление операциями панорамирования, масштабирования, выбора и изменения траектории пролета должно осуществляться с помощью мыши;

- организация вращения, поворотов;

- организация “проезда” по поверхности и движения на заданной высоте;

- возможность отображения параметров азимута и наклона линии движения;

- динамическое управление составом слоев и легендой.

Возможность описания и проверки ограничений:

- территорий и объектов историко-культурного наследия, застройки (границ поселений, границ землепользований, границ правовых зон);

- территорий природопользования, с.-х. производства, инфраструктуры;

- природных объектов (экзогенных, сейсмоопасных участков, вечной мерзлоты и т.п.).

### *Архитектура системы*

Ввиду специфики приложений, значительной протяженности объектов, прохождения трассы в различных природно-ландшафтных условиях, очевидна необходимость точной географической привязки всех данных, адекватное и точное представление рельефа и окружающих ландшафтов. Поэтому выбор базисной оболочки должен производиться в классе геоинформационных модулей трехмерного моделирования. Для длинных магистральных трубопроводов основным способом передачи особенностей территории и представления реального ландшафта является использование цветных космических снимков высокого разрешения и других данных ДЗ, натягиваемых на каркас трехмерной модели рельефа. Создаваемая система должна обеспечить их эффективное представление (для растров снимков больших объемов), совмещение с векторными слоями ГИС, САПР и последующее пополнение данными геодезической съемки.

Наилучшую функциональность для этих условий и требований дает система ERDAS Imagine с модулем Virtual GIS, в которой реализованы практически все технологические этапы формирования 3D ГИС, и для создания которой достаточно подготовить ЦМР и ортофото снимков. Особенности процесса их подготовки описаны в следующих разделах статьи.

При выборе системы, предназначенной для работы на достаточно ограниченной и сравнительно знакомой пользователям территории, на первый план могут выйти задачи пространственного анализа, которые эффективнее других реализуются на основе специализированных модулей векторной ГИС (например, ArcGIS 3D Analyst, AutoCAD Civil 3D

(Рюмкин, 2002). Если же центральной задачей является эффективная реализация программной системы, обеспечивающей наиболее полную информационную поддержку всего процесса проектирования, то возможно создание новой программной системы (Мирза и др., 2006).

### ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ

Для первичного наполнения системы потребуются формирование цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) на коридор прохождения трубопровода, подбор космоснимков, их обработка и пространственная привязка. В соответствии с рекомендациями по созданию геовизуальных технологий (Andrienko, 2010; Bodum, 2005) нужно подобрать эти данные разных масштабов, обеспечив адекватность передачи свойств территории. В ряде случаев, (для преодоления сложных участков, ситуаций сложного рельефа, форсирования водных препятствий и т.п.) понадобится подготовка ЦММ и ЦМР необходимых крупных масштабов, более подробных, нежели принятых в целом для всей территории. В некоторой степени этот выбор масштабов определен из опыта проектирования и фиксирован СНиП на изыскания (но для карт на твердой основе, а для ЦММ и 3D нужны дополнительные исследования).

Для построения ЦМР на множестве высотных отметок, изолиний высот и структурных линий строится триангуляция (аппроксимация с помощью нерегулярной сети треугольников) (Иванов и др., 1999, Wang et al., 2001). Данная ЦМР потом может быть полностью использована в проектных расчетах. Для искусственных объектов (трубопровод, сооружения, застройка) и элементы ландшафта возможна их подготовка специализированными программными средствами (AutoCAD, GIS) с последующим импортом в данную систему. Сформированный растр снимков аккуратно накладывается на каркас рельефа совместно с элементами векторных слоев ГИС и искусственных объектов. Созданная система должна быть пригодна для последующего мониторинга ситуации с пополнением системы новыми данными и редактированием существующих баз данных в соответствии с изменениями текущей ситуации и проектными решениями.

### *Представление рельефа*

Для моделирования ландшафтов и окружающей среды обеспечивается представление рельефа (Хромых, 2007; Скворцов, Мирза, 2006) с помощью сети высотных отметок на регулярных решетках (GRID) и нерегулярных систем отсчетов (TIN). При этом обычно используются все наиболее распространенные способы задания рельефа на топографических, тематических картах и планах, в проектной документации с помощью высот-

ных отметок, изолиний, структурных линий, данных радарной съемки и лазерного сканирования. Производится импорт соответствующих ЦМР. На основе собранных данных организуется управляемый режим расчетов используемой ЦМР с выбором шага отсчетов высотных отметок, способа аппроксимации поверхности и ее визуализации. Программная среда должна обеспечить базовые возможности анализа рельефа с помощью различных средств представления поверхности (расчетные изолинии, легенды высот, “отмывка” рельефа), а также построения разрезов произвольной конфигурации в плане. Для ЦМР обзорного уровня используются данные о рельефе местности с топокарт масштаба не мельче 1 : 200 000.

Обычно при формировании ЦММ и ЦМР нужно подробное представление рельефа на узкий коридор вариантов трассы, ее важнейших участков и менее точное – для более широкого коридора. Для их формирования используют данные топокарт и планов необходимых масштабов по точности, данные радарной съемки, геодезических измерений, лазерного зондирования. Процесс формирования ЦМР обычно включает сканирование топокарт, геометрическую коррекцию растра, сшивку растров в блоки (в пределах одной зоны в проекции Гаусса-Крюгера), специальную обработку растров для векторизации, векторизацию данных о рельефе, формирование таблиц атрибутов, сшивку отдельных блоков (в том числе в смежных зонах Гаусса-Крюгера), проверку топологии и корректности полученной ЦМР. Рельеф на планшетах представлен изолиниями, высотными отметками и дополнительными структурными линиями (береговыми линиями рек и озер, границами обрывов, оврагов, промышленных выработок и т.д.). Эти структурные линии – не плоские, так как принадлежащие им точки могут иметь различные высоты на участке рельефа, являясь трехмерными.

Все линии и высотные отметки рельефа необходимо оцифровать, т.е. представить их наборами узловых точек с прямоугольными координатами  $X$ ,  $Y$  (положение на плоскости). Кроме того, в каждой точке должна быть известна высота (координата  $Z$ ). Значения высот в узлах изолиний и высотных отметках задаются прямо при оцифровке, а в узлах трехмерной линии их можно определить с помощью интерполяции, если к линии примыкают изолинии (граница оврага, обрыва) или прямо на ней заданы высотные отметки (уровни уреза воды на береговых линиях). Для расчета цифровой модели рельефа необходимо по множеству узловых точек всех линий и высотных отметок построить интерполирующую поверхность. При этом требуется, чтобы не только узлы, но и все структурные линии рельефа целиком принадлежали данной поверхности. Наиболее простой и удобной является кусочно-линейная интерполяция поверхности рельефа. При этом по

координатам  $X$ ,  $Y$  всех точек строится триангуляция Делоне (Фукс, 2000) таким образом, чтобы множество ребер треугольников включало все отрезки структурных линий. Тогда задание высоты  $Z$  во всех вершинах определяет интерполирующую поверхность как набор пространственных треугольников. Такая триангуляция носит название триангуляции с ограничениями и для ее решения созданы специальные алгоритмы (Скворцов, Мирза, 2006; Hjelle, Daehlen, 2006). Иногда полученный растр содержит много “шума”, для уменьшения которого приходится либо пересканировать изображение, меняя параметры контрастности и яркости сканерной утилиты, либо использовать какой-нибудь редактор растров, например Adobe Photoshop. Но более важным недостатком являются деформации исходного изображения, которые приводят к заметным ошибкам в определении координат узловых точек при оцифровке. Обычно это локальные деформации отдельных участков, не устраняемые линейным преобразованием всего изображения (поворотом, сдвигом, изменением масштаба по осям). Поэтому было использовано кусочно-линейное преобразование (интерполяция) растра. На любом планшете можно указать по крайней мере 36 точек-перекрестий, для которых известны реальные координаты на местности (чем больше таких точек, тем лучше).

По этим точкам в координатах исходного растра строится триангуляция Делоне. Размер нового растра выбирается таким образом, чтобы можно было легко перейти от реальных координат выбранных точек к их координатам в новом растре (например, 5000 или 10000 точек на 1000 м). Теперь для произвольной точки  $M$  исходного растра (не фонового цвета), лежащей в некотором треугольнике  $ABC$ , можно вычислить ее координаты  $r$  и  $p$  (строка и позиция) в новом растре

$$r_M = ar_A + br_B + cr_C, \quad p_M = ap_A + bp_B + pc,$$

где  $a = \frac{s(BCM)}{s(ABC)}$ ,  $b = \frac{s(CAM)}{s(ABC)}$ ,  $c = \frac{s(ABM)}{s(ABC)}$  – барицентрические координаты  $M$  в  $\triangle ABC$  ( $s$  – площадь треугольника, рис. 1). Это преобразование непрерывно на ребрах треугольников, а взаимоположение вершин в новом растре соответствует реальным координатам точек.

Полученный растр использовался в качестве подложки, необходимой для векторизации (оцифровки) изображения – отслеживания всех линий рельефа с расстановкой необходимого числа узловых точек и высотных отметок.

Векторизация является самой трудоемкой частью работы по построению модели рельефа: число линий на разных планшетах составляет от нескольких десятков до нескольких сотен (в зависимости от рельефа) соответственно, число снятых узловых точек изменяется от 5000 до 30000 и бо-

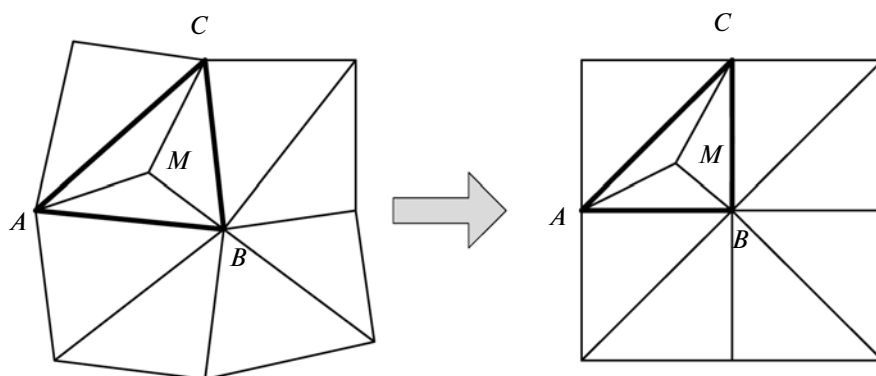


Рис. 1. Кусочно-линейное преобразование раstra.

лее. Правильность проведения линий при векторизации легко определяется визуально, однако при оцифровке возможны ошибки, которые существенно искажают рельеф, но обнаруживаются лишь спецпроверками:

- наличие частично или полностью совпадающих, а также пересекающихся объектов, имеющих разные высоты;

- недостаточное количество примыкающих к трехмерной линии изолиний и высотных отметок, что не позволяет рассчитать высоты во всех узловых точках;

- недопустимые значения высот для изолиний и высотных отметок.

В приведенном выше общем описании процесса построения ЦМР следует отметить особую важность задачи учета структурных линий, приводящую к необходимости построения триангуляций с ограничениями. В распространенных программных системах эти особенности отражаются недостаточно. При этом ошибки представления рельефа особенно явно “выпирают” при соединении со снимком, когда видимое изображение не соответствует ЦМР и грань изгиба, например, оказывается на наклонной плоскости и т.п. В САПР-задачах такие ошибки также приводят к издержкам проектных решений, но они часто не так заметны, как при визуализации.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Применение данных ДЗ для описания территории, анализа ситуаций, подготовке проектных и управленческих решений чрезвычайно разнообразно (Рюмкин, 2002). В рамках описываемой системы они наиболее полезны для создания реалистичных моделей ландшафтов и обновления топокарт по территории деятельности. И в том и другом случае обработка исходных геоизображений включает одинаковые этапы – предварительную обработку растров, пространственную при-

вязку, создание ортофото и т.п. Следует отметить высокую актуальность и практическую значимость задач обновления топоосновы, поскольку по многим территориям России картографический материал очень старый и нуждается в обновлении. Старые технологии дороги, трудоемки и длительны по времени. В обработке данных ДЗ наибольшее технологическое преимущество обеспечивает улучшение качества исходных снимков и автоматизации операций при дешифрировании. Здесь многого можно добиться за счет использования космосъемки высокого разрешения и новых методов дешифрирования.

Выбор конкретного сенсора зависит от характера решаемых задач и требуемых при этом точности и разрешения. Следует учитывать, что определение данных с излишней точностью и разрешением способно значительно увеличить объем привлекаемых данных по снимкам и сделать громоздким, неоправданно “утяжелить” весь проект. Таким образом, аккуратный подбор приемлемого разрешения геоизображений из соображений компромисса между их точностью и объемом соответствующей базы данных становится одним из важнейших решений по созданию системы на данном этапе (формирования прототипа системы).

В составе обычного проекта можно выделить следующие уровни описания:

- 1) обзорный уровень проекта в целом;
- 2) коридор прохождения трассы трубопровода;
- 3) участки территории с трубами существующих трубопроводов;
- 4) участки равнинной территории, где трубопроводы не прокладывались;
- 5) участки гористой территории, где предстоит сделать выбор трассы.

Очевидно, что требования к разрешению снимков растут сверху вниз по этим уровням. Существенно связанными оказываются также масштаб

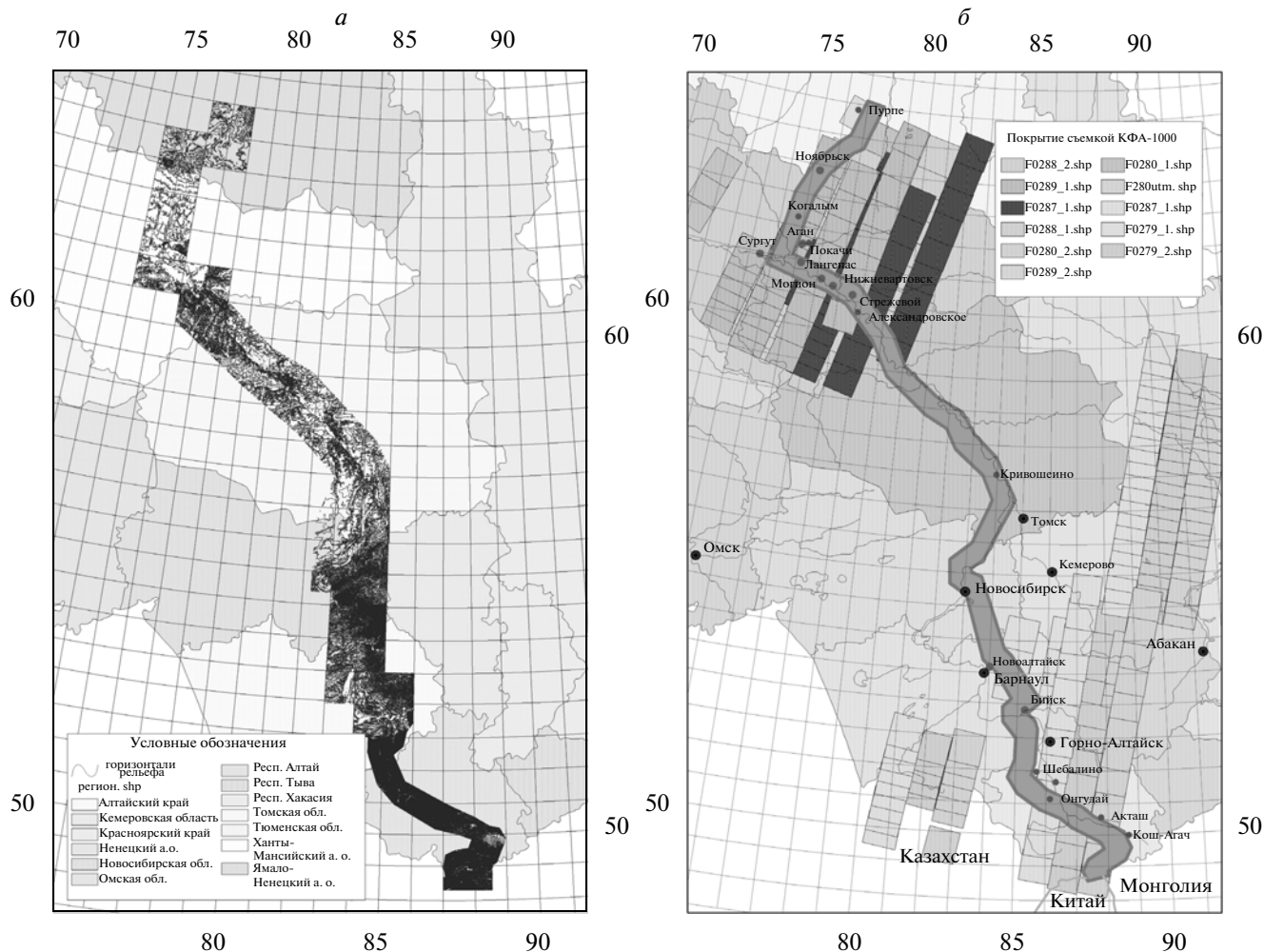


Рис. 2. Подготовленные на трассу газопровода “Алтай”: а – ЦМР; б – схема покрытия космоснимками (КФА-1000).

используемых на различных уровнях топографических карт и требуемых изображений.

На обзорном уровне проекта обычно используются топокарты М 1 : 200000, 1 : 100000. Их применение определяет и точность равномерной привязки геоизображений, которая на этом уровне минимальна. Естественно, что при этом можно использовать изображения “Ресурс Ф1” (КФА-1000), SPOT-4. На коридор прохождения трассы при общем обзорном показе нужно разрешение повыше. Это обеспечивается применением космоснимков ALOS (PRISM), IRS или RapidEye. Для ситуаций 3–5 требования по разрешению наиболее высоки, и здесь рекомендуется использовать космосъемку высокого разрешения (КВР, ДК, GeoEye, Ikonos, QuickBird). Для наиболее ответственных участков используются самая высокодетальная съемка (ДК, GeoEye, WorldView, QuickBird), аэрофотосъемка и данные лазерного зондирования, совмещенные с цифровой аэрофотосъемкой зондируемой территории. В ряде приложений также используется совмещение

космоснимков различных камер и разного разрешения.

При выполнении проектов нами были экспериментально опробованы различные варианты сочетания космических снимков разных платформ для представления конкретных ситуаций описания территории. Например, рельеф и мозаика обзорного уровня для проекта газопровода “Алтай” на основе снимков КФА-1000 приведены на рис. 2. Описание территории выхода трассы газопровода с плато Укок на перевал Канас выполнено с помощью высокодетальной съемки, уложенной на подробную модель рельефа (рис. 3–5). В ходе практической работы обычно экспериментально выявляются возможности комбинирования таких изображений в различных сочетаниях и выбираются эффективные комбинации для разных приложений и режимов просмотра. Наиболее эффективны подобные режимы при коллективном анализе и обсуждении ситуаций с участием представителей разных подразделений проект-



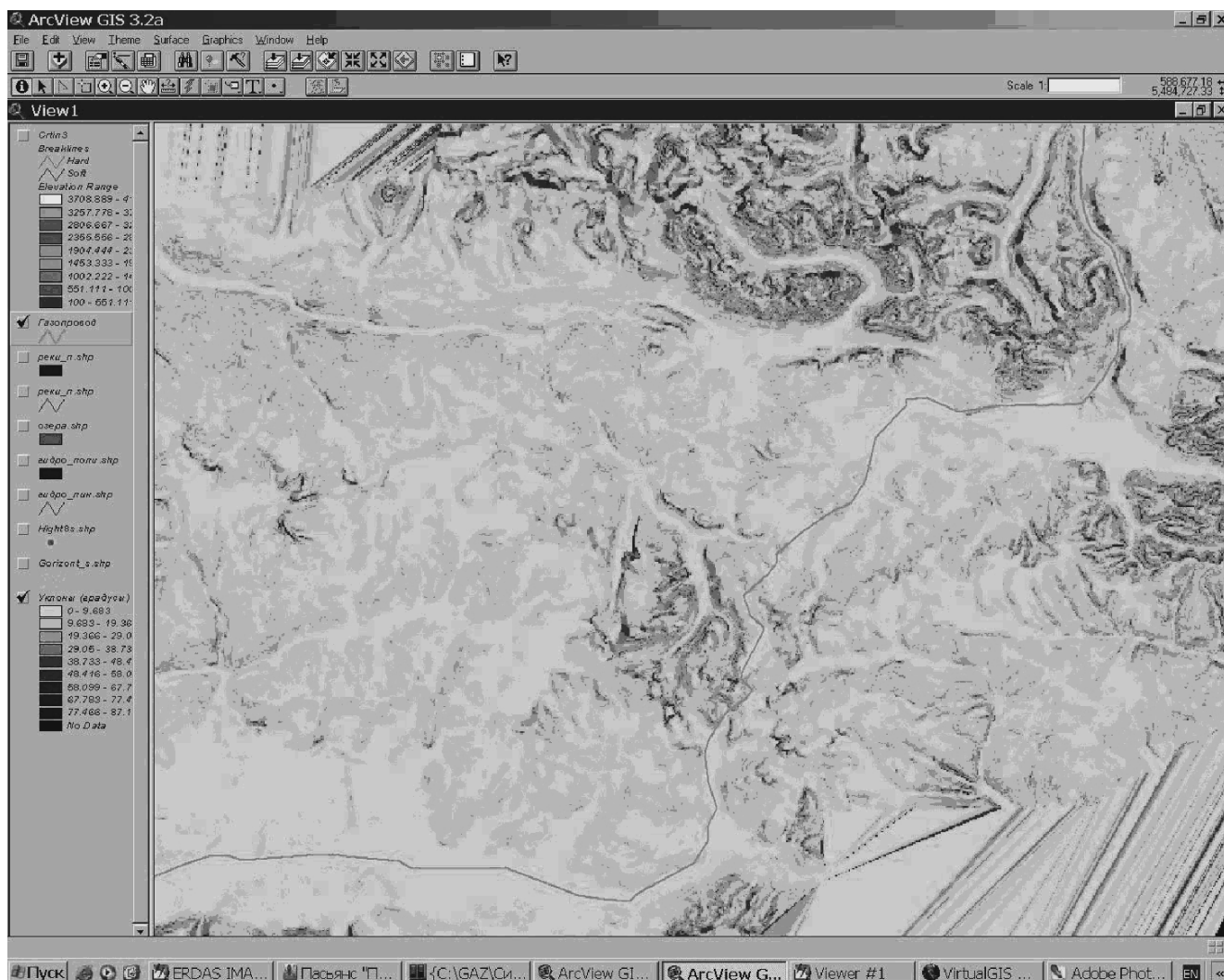


Рис. 3. Уклоны поверхности, рассчитанные по рельефу (выход на плато Укок).

ной организации – сотрудников отделов изысканий, трубопроводов, автоматизации, бюро ГИП.

### ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

В процессе проектирования очень важны оценки и уточнения как отдельных участков трассы, так и оценки влияния отдельных факторов окружающей среды, неравномерно распределенных в области коридора трубопровода. Такие оценки удобно осуществлять и воспринимать на основе предварительного расчета и геовизуализации пространственных распределений факторов, или их совокупности. Обычно данные по отдельным факторам и соответствующие тематические карты готовятся профильными подразделениями проектного института, или сводятся ими из отчетов субподрядчиков. С помощью ГИС достаточно легко провести расчет производных материалов по этим данным,

обеспечить анализ и геовизуализацию для коллективного анализа. Например, важную информацию для выбора маршрута трубопроводов дают данные по свойствам грунтов, наличию опасных участков, ограничений, уклонам поверхности и др. На рис. 3 показано поле уклонов поверхности, представленное с помощью цветовой шкалы значений уклонов, что позволяет существенно облегчить выбор трассы на этом участке.

Уже при предварительном выборе трассы могут быть весьма полезны функции геовизуализации на основе материалов “драпировки рельефа космоснимками”. Например, при выборе трассы газопровода “Алтай” при входе в Горный Алтай с севера традиционный расчет (камеральное трассирование с предварительным выбором конкурентоспособных вариантов трассы – по (СНиП, 1996, п. 6.1.3)) был на выбор трассы по берегу р. Катунь, и лишь осмотр этих мест с вертолета убедил проектировщиков отойти от этого очень

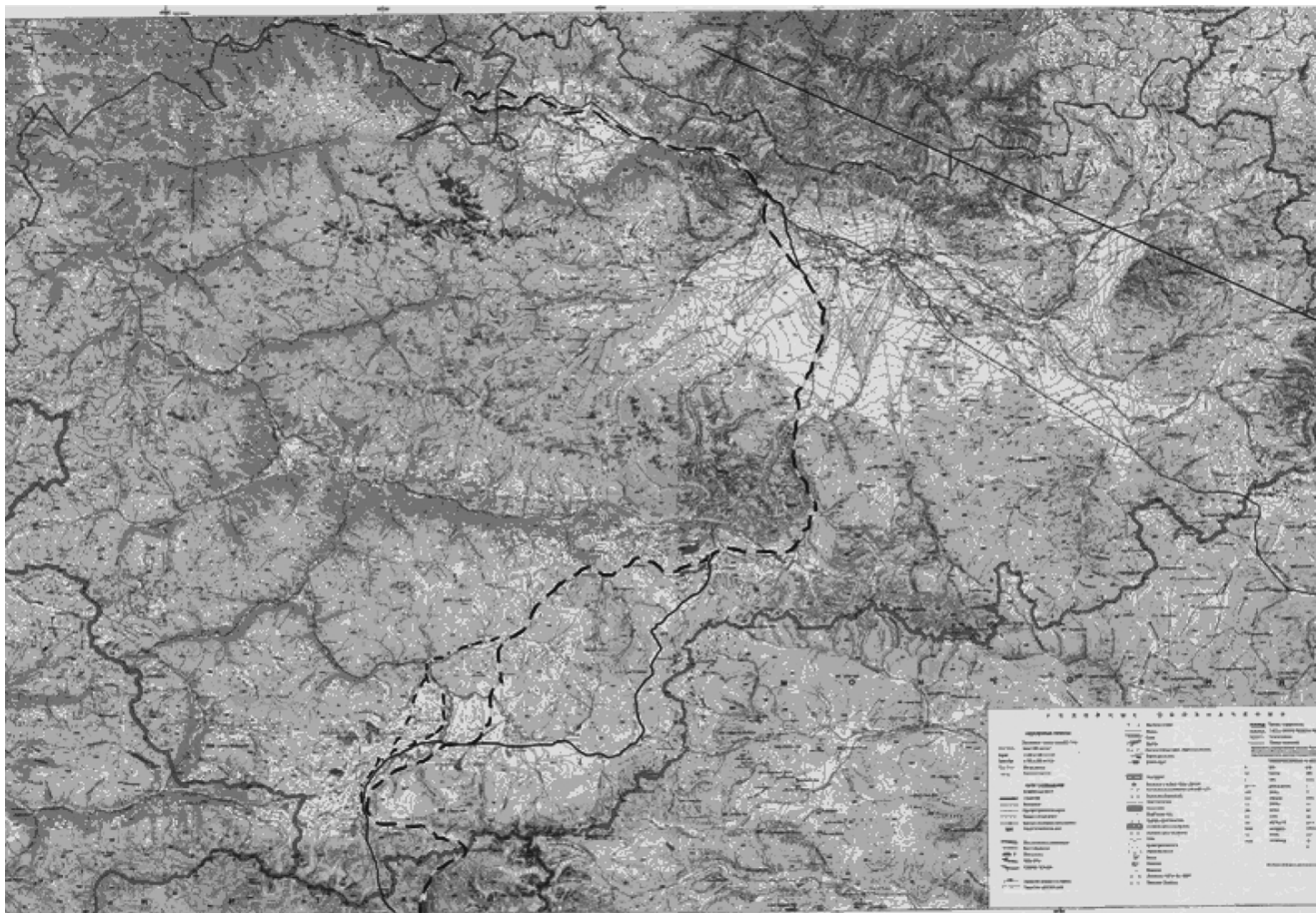


Рис. 4. Варианты трассы МТП «Алтай» на южных участках.

дорогого варианта в пользу долины р. Песчаной, лежащего западнее. Хотя вполне наглядное представление ситуации обеспечивает 3D ГИС с помощью соответствующих виртуальных пролетов. Аналогичные задачи возникают при анализе трассировки газопровода (ГП) по долине р. Чуи, переходе перевалов. Здесь также часто требуется итеративный переход от мелкого масштаба с грубым выбором трассы к ее детализации на опасных участках. Иногда лишь при детальном представлении территории очевидны невозможность прокладки трассы в ряде мест или большое удорожание, что приводит к необходимости возврата на верхний масштабный уровень и изменения трассы. Аналогичные ситуации возникали и на трассах магистрального трубопровода (МТП) «Сахалин–Владивосток» и при трассировании МТП в Южной Якутии.

Много вариантов возникает при трассировке ГП в южной части Горного Алтая (рис. 4). Здесь нами проводилось создание подробных моделей ситуации на основе представления рельефа и высокодетальной космосъемки для трех участков в районе перевала Канас на русско-китайской границе (переход по перевалу вдоль морены, выход

восточнее, с обходом по склону над озером и переход через перевал Карандыр). На рис. 5 показан виртуальный пролет с выходом трассы на перевал Канас, а на рис. 6 – на перевалы Канас (слева) и Карандыр (справа). Оба этих рисунка – кадры фильмов, синтезированных в виртуальной ГИС проекта. При этом вариант перевала Карандыр возник уже после завершения основных работ по инициативе китайской стороны. Обоснование трудоемкости (фактически невозможности) этого варианта, в связи с этим, могло выполняться лишь на основе ранее созданной 3D ГИС. Были построена более подробная ЦМР, наложены снимки высокой детальности и сформирован деморолик, показывающий наличие крупного ледника, практически исключающего здесь трассировку трубопровода. Виртуальный пролет с выходом восточного варианта трассы на приграничное озеро показан на рис. 7, где видно, насколько круты склоны гор над берегом озера на всем протяжении.

Для распространенной модели выбора при помощи функции *least cost pathway* модуля *Spatial Analyst* системы *ArcGIS* со сверткой факторов удорожания в критерии итерации удобен компьютерный расчет с визуализацией для последовательного

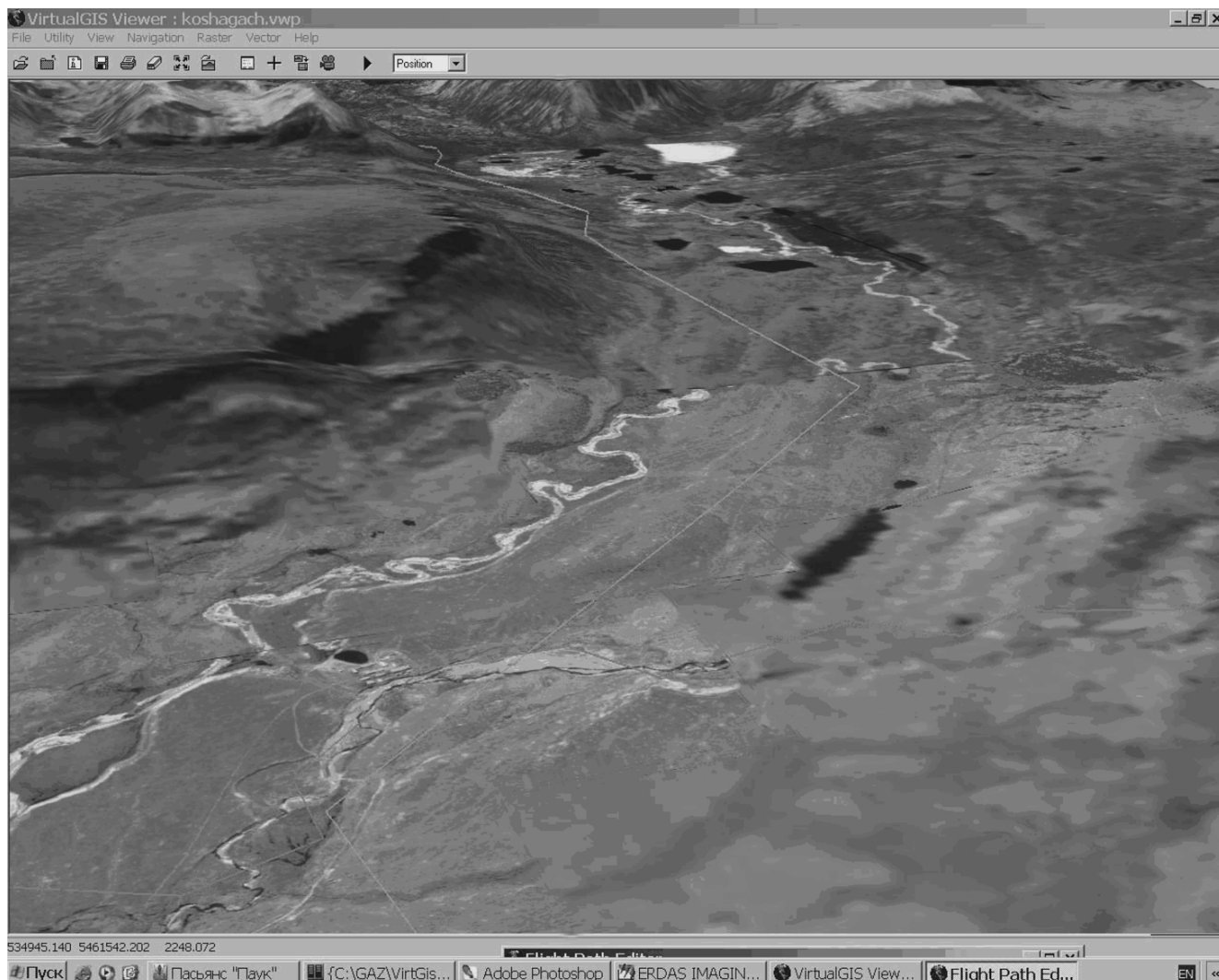


Рис. 5. Виртуальный пролет с выходом трассы на перевал Канас.

подбора значений весов факторов и их сочетаний, наиболее соответствующих представлениям экспертов. Аналогично отображаются пространственные ограничения, значения оценок рисков опасных процессов.

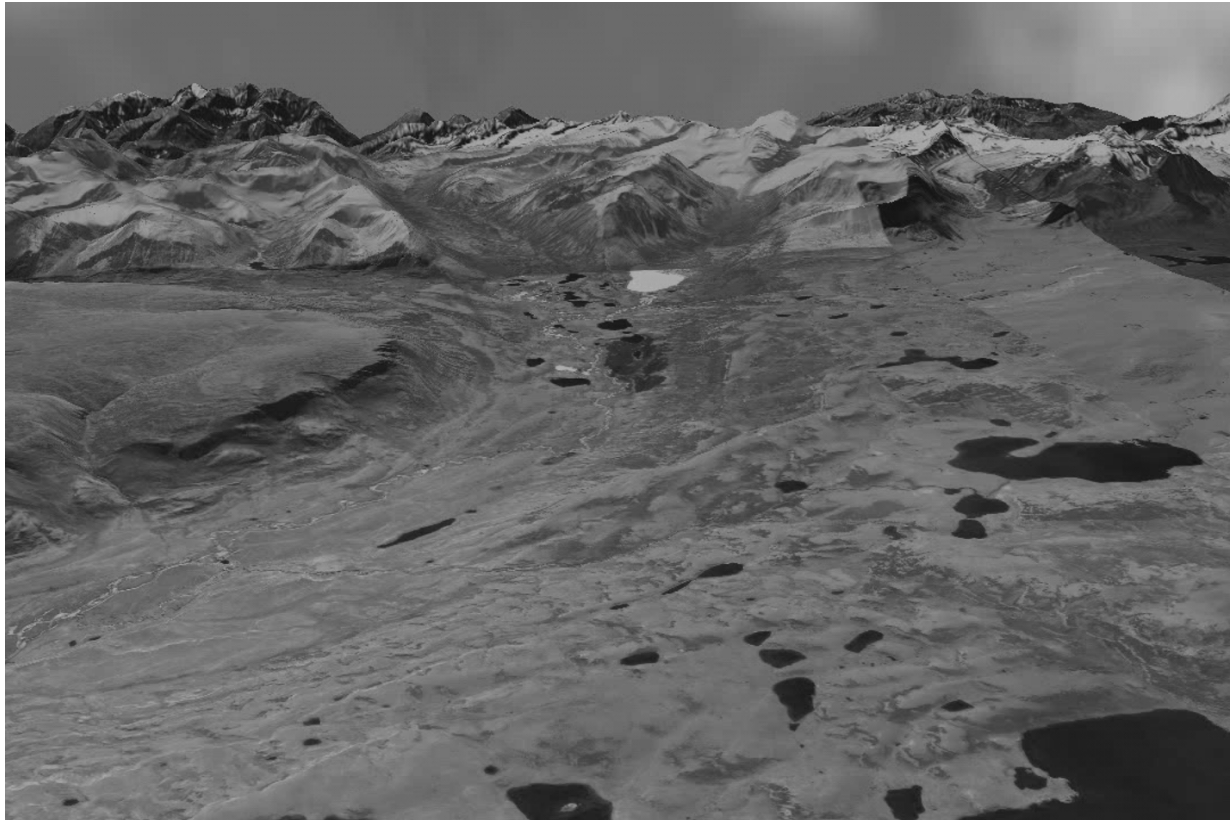
### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Практически полезными оказались вычисления пересечений водотоков трассой МТП. Многие водные объекты со временем меняют свои характеристики, русла и контуры, которые не всегда соответствуют нанесенным на картах и требуют уточнений по данным ДЗ. Полезны, например, снимки паводковой ситуации, полученные в период разлива рек. Здесь также удобно для анализа гидрологической ситуации оперативно формировать методами геовизуализации тематические карты. Например, увязывая ширину линий водотоков с их

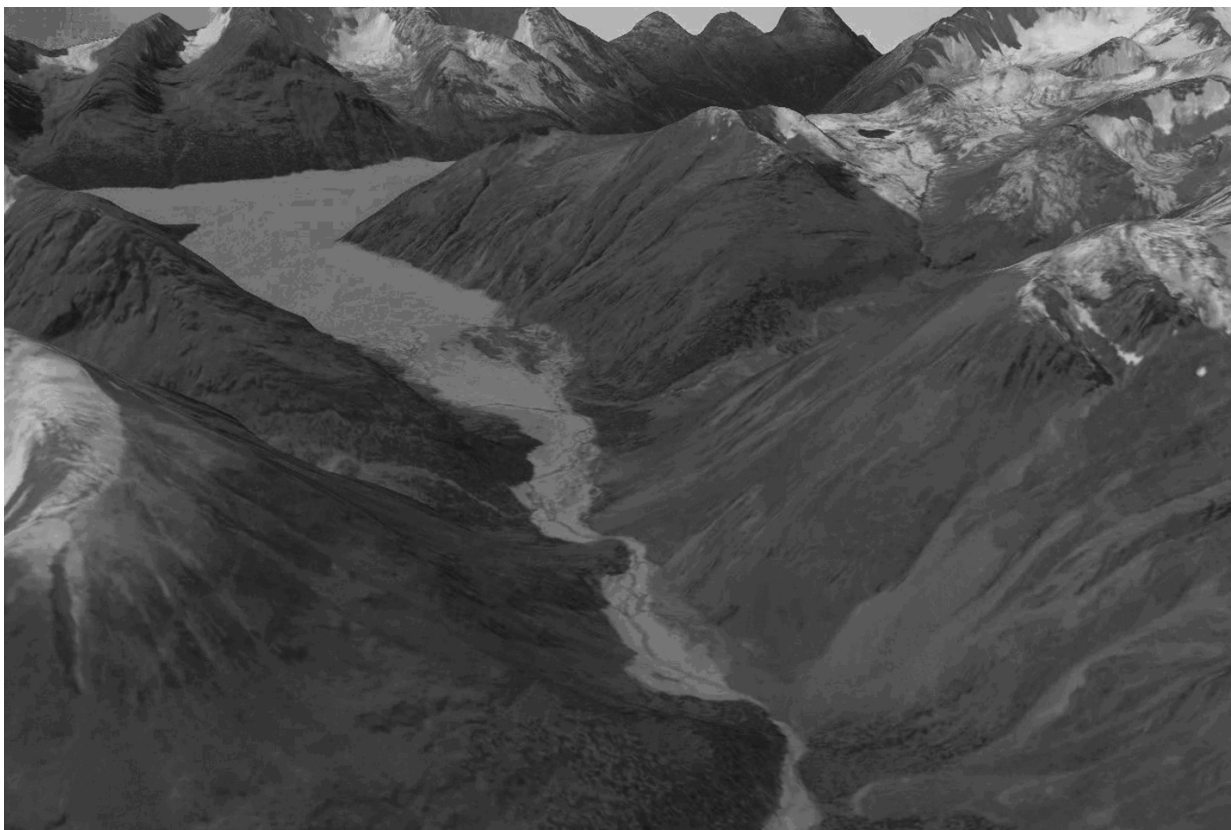
объемами стока, площадями водосборных бассейнов, формируя пространственно-временные базы данных и изображений.

Полезно дешифрирование данных ДЗ для земель с.-х. назначения, используемого очень широко при согласовании отводов земельных участков. На основе этих результатов и уточненных карт в дальнейшем возможна оценка компенсации за выбытие лесных и с.-х. земель, рассчитываемая с помощью буферных зон вдоль трассы МТП. Используя данные ДЗ и методы геовизуализации, можно точнее обеспечить выбор трассы, например, с учетом кадастровой оценки земель, сопоставлений вариантов трасс по стоимости и т.п. Близкие ситуации возникают и при согласовании обходов участков с памятниками истории, культуры, охраняемыми природными объектами.

При дальнейшем развитии данных технологий необходимо устранение противоречий потенциаль-



**Рис. 6.** Виртуальный пролет с выходом с севера на перевалы Канас и Карандыр на российско-китайской границе.



**Рис. 7.** Кадр фильма подлета к приграничному озеру (восточный вариант трассы).

но возможного оперативного согласования проектных карт на основе “цифрового документооборота” с действующими процедурами согласования бумажных выкопировок, часто неактуальных, неточных, но имеющих официальный статус.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ особенностей ранних стадий процесса проектирования магистральных трубопроводов и определены требования к характеристикам программных систем. Описаны основные элементы технологии построения трехмерных ГИС, поддерживающих режим геовизуализации. На реальных примерах показаны простые варианты применения этого режима, обеспечивающего интеграцию локальных компьютерных проектных решений с возможностями анализа проектных ситуаций и коллективного экспертного выбора наилучших вариантов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемов Ю., Артемова Е.* Новые технологии в проектировании магистральных трубопроводов // ArcReview. 2001. V. 2. № 17. С. 14.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–16.
- Бородавкин П.П., Березин В.Л., Рудерман С.Ю.* Выбор оптимальных трасс магистральных трубопроводов. Л.: Недра, 1974. 240 с.
- Брауде Э.Дж.* Технология разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2004. 655 с.
- Дерцакян А.К., Шпотаковский М.Н., Волков Б.Г. и др.* Справочник по проектированию магистральных газопроводов. Л.: Недра, 1977. 519 с.
- Земля из космоса. Спецвыпуск: ДЗЗ в нефтегазовой отрасли. Вып. 8. 2011.
- Иванов В.П., Фукс А.Л., Рюмкин А.И.* Построение электронных моделей территории Томска на основе высокодетаальной космосъемки // Геоинформатика. Томск: ТГУ, 1999. С. 235–244.
- Ищук А.А., Швайко В.Г., Курбацкий А.С.* Возможности пространственного моделирования в ГИС интегрированной стоимости трасс проектируемых коммуникаций // ArcReview. 2005. № 1. С. 13–16.
- Корсей С., Прохожаев Р., Рьльский И.* Оптимизация трассы трубопровода с помощью ГИС // ArcReview. 2003. № 1. С. 20–21.
- Коршак А.А., Нечваль А.М.* Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. СПб.: Недра, 2008. 488 с.
- Кутуков С.Е.* Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов. М.: СИП РИА, 2002. 324 с.
- Мирза Н.С., Петренко Д.А., Скворцов А.В.* Технология трехмерной визуализации данных ГИС и САПР Indor-Viewer 3D // Вестн. ТГУ. 2006. № 290. С. 267–270.
- Протасов К.Т., Рюмкин А.И.* Непараметрический алгоритм распознавания объектов подстилающей поверхности Земли по данным аэрокосмической съемки // Вестн. ТГУ. 2002. № 275. С. 41–46.
- РД 153-39.4Р-128-2002 (ВСН) Инженерные изыскания для строительства магистральных нефтепроводов. 2002.
- Рьльский И.А.* Оптимизация трасс трубопроводов с использованием ГИС-технологий // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2004. № 4. С. 34–41.
- Рюмкин А.И.* Информационное обеспечение 3D-ГИС для проектирования и реконструкции магистральных трубопроводов и трасс инженерных коммуникаций // Математич. модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем / Тр. XII Всерос. науч. семинара с международ. участием. Ай-Петри, п. Корезиз, г. Ялта, Украина, 20–26 сентября 2010. Москва–Иркутск: ИСЭМ, 2010. С. 437–448.
- Рюмкин А.И.* О геоинформатике в Томском государственном университете и научно-производственном объединении “Сибгеоинформатика” // Вестн. ТГУ. 2002. № 275. С. 33–40.
- Рюмкин А.И., Кравченко Г.Г.* Организация регионального развития на основе геоинформационных технологий // Геоинформатика. 2007. № 2. С. 36–42.
- Рюмкин А.И., Чумичев И.И.* Интеграция геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования в задачах управления устойчивым развитием области // Мат. междунар. конф “Интеркарто-4. ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий”. Барнаул, 1998. С. 232–240.
- Скворцов А.В., Мирза Н.С.* Алгоритмы построения и анализа триангуляций. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. 168 с.
- СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
- СП 47.13330.2011 Свод правил. Инженерные изыскания для строительства магистральных трубопроводов (Актуализированная редакция СНиП 11-02-96).
- Фукс А.Л.* Быстрый алгоритм триангуляции Делоне, основанный на предварительной обработке набора точек // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. “Геоинформатика-2000” Томск: Изд-во ТГУ, 2000. С. 45–50.
- Хромых В.В., Хромых О.В.* Цифровые модели рельефа. Томск.: Изд-во ТМЛ, 2007. 177 с.
- Andrienko G., Andrienko N., Demšar U., Dransch D., Dykes J., Fabrikant S., Jern M., Kraak M.J., Schumann H., Tominski C.* Space, time and visual analytics // Int. J. Geogr. Inform. Sci. 2010. V. 24. № 10. P. 1577–1600.
- Balogun L.F. et al.* Optimal Oil Pipeline Route Selection using GIS: Community Participation in Weight derivation and Disaster Mitigation // Int. Conf. Future Environm. and Energy. PCBEE. 2012. P. 100–104.
- Balogun L.F., Matori A.N., Lawal D.U.* Geovisualization of Sub-surface Pipelines: A 3D Approach // Modern Appl. Sci. 2011. V. 5. № 4. P. 158–165.
- Batty M., Vargas C., Smith D.* Visually-intelligible land use transportation models for the rapid assessment of urban futures. Centre for Advanced Spatial Analysis Univ. College London. WP № 163. 2011.

- Bodum L.* Modelling virtual environments for geovisualization // *Explor. Geovisualiz.* 2005. P. 389–402.
- Delevar R.M., Naghibi F.* Pipeline routing using geospatial information system analysis // *ScanGIS'03. 9th Scandinavian Res. Conf. on Geogr. Inform. Sci. 4–6 June 2003. Espoo: Finland—Proceedings, 2003.* P. 203–213.
- He J., Zou Y., Ma Y.* Assistant Design System of Urban Underground Pipeline Based on 3D Virtual City // *Proc. Environm. Sci.* 2011. V. 11. P. 1352–1358.
- Hjelle O., Daehlen M.* *Triangulations and Applications.* Springer, 2006. 237 p.
- Kabanov M.M., Kapustin S.N., Ryumkin A.I., Fuks A.L., Chumichev I.I.* Control of the Territory Condition using the Space Survey in Optical Range // *Pattern Recogn. Image Anal.* 1999. V. 9. № 2. P. 388.
- Kjems E.* VR for decision support in urban planing // *Virtual Applications: Applications with Virtual Inhabited 3D Worlds.* L.: Springer-Verlag, 2004. P. 13–28.
- Use of High-Resolution Remote Sensing for Gas-Line Route Selection. Wisconsin Power & Light, Environmental Remote Sensing Center, Univ. of Wisconsin-Madison. Final rep. 1997.
- Nielsen A.* User-centered 3D geovisualization // *Proc. 12th. Int. Conf. on Geoinform. Univ. Gävle, Sweden, 2004.* P. 412–416.
- Wang K, Lo C.-P., Brook G.A., Arabnia H.R.* Comparison existing triangulation methods for spaced height fields // *Int. J. Geogr. Inform. Sci.* 2001. № 8. P. 743–762.
- Yildirim V., Nisançi R., Reisa S.* GIS based route determination in Linear Engineering Structures Information Management (LESIM) // *Shaping the Change. XXIII FIG Congress. Munich, Germany, October 8–13, 2006.*

## Geovisualization with Remote Sensing Data in Gas Pipeline Designing

A. I. Ryumkin, E. S. Tyabaev

*National Research Tomsk State University, Tomsk*

*NPO Sibgeoinformatica, Tomsk*

Applicability of a method of geovisualisation in making of three-dimensional geoinformation systems (3D GIS) on the basis of digital elevation models (DEM) the Earth remote sensing data (RSD) for a substantiation of design decisions of early design stages of the turnpike pipelines is explored. In practical problems of performance of a predesign stage works for the Siberian pipelines development of DEM is fulfilled, variants of DEM coverings of line and pictures of different scale, the permission and feature of construction of a triangulation for DEM are spotted. The spatial analysis of the pipeline trace taking into account the existing description of natural resources, building objects, engineering communications and restrictions in the form of borders of nature sanctuaries and a cultural heritage is carried out. It is shown that at Improvement of variants of tracing on responsible sites the geovisualization methods have the major value, allowing to integrate with computer support the strongest abilities of experts and possibility GIS and of geoimages. Almost all possibilities of passing use of the spatial analysis in constructed 3D GIS with visualization of effects on resultant images are thus maintained. On real examples essential usefulness of methods of geovisualization is shown at making of information technologies of support of design decisions on designing of the turnpike pipelines. Systems created thus, DEM and databases are suitable for the organization in the subsequent monitoring of processes of building and pipeline maintenance.

**Keywords:** remote sensing, geovisualization, oil and gas pipeline, digital elevation models