

карту, построенную в Центре «ГЕОН» [5], была дополнительно построена карта изопахит слоя КМ (рис. 5).

Таким образом, по аэрогеофизическим данным с использованием априорной информации были построены карты кровли и мощности слоя КМ (коро-мантийная смесь) для южной части Восточно-Европейской платформы и показаны границы распространения этого слоя.

Показано, что:

распространение слоя КМ в основном приурочено к Днепровско-Донецкому рифту и очевидно связано с его развитием;

возможно распространение слоя КМ в пределах Прикаспийской впадины;

при наличии в нижней части земной коры слоя КМ кровля этого слоя представляет собой наиболее отчетливо выраженную гравиактивную границу, отраженную в региональном поле силы тяжести. При отсутствии этого слоя, наиболее выраженной гравиактивной границей, отраженной в региональной составляющей поля силы тяжести, является граница Мохо.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // Геофизика. — 2003. — № 4. — С. 37–40.
2. Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедевонского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. / Под ред. А.Ф. Морозова, Н.В. Межеловского. Т. 2. — М.: Роснедра, РАН, ГЕОКАРТ, 2010. — 400 с.
3. Костюченко С.Л., Морозов А.Ф. и др. Глубинное строение и геодинамические аспекты эволюции Европейского юга России // Разведка и охрана недр. — 2004. — № 4. — С. 4–9.
4. Шрайбман В.И., Жданов М.С., Витвицкий О.В. Корреляционные методы преобразования и интерпретации геофизических аномалий. — М.: Недра, 1977. — 237 с.
5. Kostyuchenko S.L., Morozov A.F., Stephenson R.A., Solodilov L.N., Vedrentsev A.G., Popolitov K.E., Aleshina A.F., Vishnevskaya V.S., Yegorova T.P. The evolution of the southern margin of the East European Craton based on seismic and potential field data // Tectonophysics. — 2004. — V. 381. — P. 101–118.

© Агеев С.Н., Лёвин Ф.Д., 2015

Агеев Сергей Николаевич // ageevsn@aerogeo.ru  
Лёвин Фёдор Дмитриевич // fedorl@aerogeo.ru

УДК 550.83:550.8.052

Скловский С.А., Панарин А.А. (ООО «Геолого-Геофизическая Компания»)

#### ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ ПО МАТЕРИАЛАМ ТЕПЛОЙ ИНФРАКРАСНОЙ АЭРОСЪЕМКИ

Тепловая инфракрасная аэросъемка (ТИКАС) позволяет решать целый ряд целевых задач картирования и контроля состояния техногенных и природных объектов. Прежде всего — это задача картирования продуктопроводов, в том числе тепловых сетей. Она наиболее актуальна для городских территорий, для которых ТИКАС позволяет составлять масштабные схемы тепловых сетей с результатами их дистанционной диагностики, оперативно выявлять аварийно-опасные и аварийные участки тепловых сетей. Все получаемые материалы интегрируются в це-

левые и муниципальные геоинформационные системы (ГИС). **Ключевые слова:** тепловой, инфракрасный, аэросъемка, сети, дистанционный, диагностика, картирование, геоинформационный.

Sklovskiy S.A., Panarin A.A. (Geology-Geophysical Company)

#### REMOTE DIAGNOSTICS OF PIPELINES BY THERMAL INFRARED AIRBORNE SURVEYS DATA

*Thermal infrared airborne survey allows you to solve some of targets for mapping and monitoring natural and technological objects. The first one is the mapping of pipelines, primarily thermal networks, the most relevant for urban areas, for which thermal infrared survey allows you to make large-scale schemes of thermal networks with their remote diagnostics to quickly identify dangerous and damaged sections of thermal networks. All received data are integrated into the target and municipal geoinformational systems. **Key words:** thermal, infrared, survey, networks, remote, diagnostic, mapping, monitoring, geoinformational*

Среди широкого круга задач, решаемых тепловой инфракрасной аэросъемкой (ТИКАС), наиболее востребованными являются задачи картирования и дистанционной диагностики состояния продуктопроводов — тепловых сетей, а также магистральных нефте- и газопроводов. Выполняемая с помощью специализированной авиационной тепловизионной системы высокого разрешения «ИКАР-002М» (рис. 1) ТИКАС позволяет в спектральном диапазоне 8–14 мкм с высоты 350 м получать координатно-привязанные тепловые инфракрасные (ИК) изображения в оптическом угле 120° с пространственным разрешением 0,2 м и с температурной чувствительностью 0,05° (при температуре фона 20 °С).



Рис. 1. Тепловизор ИКАР-002М на борту вертолета Robinson R-44

### 1. Подземные тепловые сети

Характерной чертой урбанизированных территорий является наличие плотной сети подземных водонесущих коммуникаций, утечки из которых приводят к изменению температурного режима грунтовых вод, их химического и бактериального состава. Особое положение тепловых сетей среди прочих водонесущих коммуникаций обусловлено следующими причинами:

В нашей стране подземные тепловые сети имеются на территории практически всех городов. Например, в Москве их общая протяженность составляет порядка 15 000 км. Общий расход циркулирующей сетевой воды составляет 250 тыс. м<sup>3</sup>/час, что пятикратно превышает дебет р. Москва. При этом по данным московских теплоэнергетических компаний полная фактическая величина утечек по Москве составляет в среднем 2 л/сек на 1 км<sup>2</sup>.

Теплосетевая вода имеет высокую температуру (от 70 °С до 150 °С) и находится под значительным давлением, что делает утечки одним из наиболее интенсивных источников воздействия на грунты (вплоть до образования суффозионных воронок) и подземные воды.

В условиях городского ландшафта утечки из тепловых сетей находят отражение в тепловом поле земной поверхности независимо от типа покрытия.

В арсенале современных средств дистанционного зондирования ТИКАС — единственный метод, позволяющий определять местоположение тепловых сетей, а также выполнять дистанционную диагностику их состояния (рис. 2).

При этом выделяются:

нормированные теплотери (трасса в нормальном состоянии, целостная и сухая теплоизоляция);

повышенная утечка тепла (влажная или нарушенная изоляция, увеличение интенсивности коррозионных процессов);

высокая утечка тепла (небольшие свищи, подопленные теплопровода грунтовыми водами или водами сопутствующих коммуникаций, нарушенная и влажная теплоизоляция);

аварийное состояние (разрыв теплопровода с изливом теплоносителя).

Наземная заверка наших данных в Москве, где ТИКАС выполняется ежегодно в режиме мониторинга показывает, что при каждом цикле аэросъемки обнаруживается до 800 аварийных и аварийно-опасных участков.

Другая весьма актуальная задача, успешно решаемая с помощью тепловой ИК аэросъемки — картирование тепловых сетей. Схемы тепловых сетей являются совершенно необходимым элементом любой муниципальной ГИС. Наш опыт работ в различных городах показывает, что существующие схемы расположения подземных тепловых сетей либо очень неточны и немасштабны, либо отсутствуют вообще. Иногда даже эксплуатационные службы точно не знают, где на самом деле проходит теплотрасса. Материалы ТИКАС позволяют за один цикл откартировать не менее 70 % сетей диаметром от 50 мм с актуализацией информации при последующих мониторинговых работах.

Важным достоинством тепловой ИК аэросъемки являются высокая производительность и оперативность. Так за один съемочный день может быть обследовано более 50 км<sup>2</sup> городской территории.

Файлы координатно-привязанных с точностью используемой навигационной системы (GPS + ГЛОНАСС) помаршрутных тепловых ИК изображений

проходят предварительную камеральную обработку (распаковку, технологическую коррекцию и т.п.), записываются на DVD диски и передаются Заказчику на следующий после аэросъемки день вместе с программой визуализации IgitView, позволяющей специалистам Заказчика незамедлительно приступить к экспресс-анализу теплового поля, выявляя явно неблагополучные участки. Дальнейшая камеральная обработка данных ТИКАС включает в себя их ортотрансформацию по исходной крупномасштабной топооснове, дешифрирование и интерпретацию теплового поля, составление (либо актуализацию) векторных схем расположения тепловых сетей и диагностику их состояния. Материалы тепловой ИК аэросъемки позволяют:



Рис. 2. Картирование тепловых сетей по данным ТИКАС (8–14 мкм, негатив)



Рис. 3. Коридор магистральных газопроводов по данным ТИКАС (8–14 мкм, негатив)

оперативно оценивать реальное состояние теплосетевой инфраструктуры города;

создавать (актуализировать) векторные схемы расположения тепловых сетей в кондициях исходной топографической основы (например, 1:2 000);

оперативно выявлять аварийные и аварийно-опасные участки тепловых сетей;

интегрировать получаемые материалы в муниципальные и специализированные ГИС;

выявлять несанкционированные подключения к теплосетям;

оценивать эффективность капиталовложений в теплосетевое хозяйство на основе мониторинговых аэросъемок;

снижать затраты на капитальный ремонт теплотрасс за счет реальной оценки состояния теплотрасс и корректировки планов ремонтных работ;

принимать решения о продлении ресурса теплосетей;

устанавливать очередность объектов капитального ремонта в зависимости от размера доступных финансовых средств.

## 2. Нефте- и газопроводы

Формирование тепловых аномалий над магистральными нефте- и газопроводами происходит так же, как и над теплотрассами. Нефть и газ в трубопроводах перекачиваются под большим давлением, за счет чего перекачиваемый продукт разогревается до температуры 45–50 °С. При большом диаметре труб ( $\geq 1000$  мм) создается кондуктивный поток тепла, достаточный для формирования положительной тепловой аномалии даже при подземной прокладке. ТИКАС позволяет решать задачи картирования местоположения ниток продуктопровода (рис. 3) и объектов его

инфраструктуры, определять участки его подтопления, выявлять утечки как подземные, так и из крановых узлов.

Опыт наших работ показывает, что тепловая ИК аэросъемка данных объектов может быть выполнена с малых (до 100 м) высот, при этом реальное пространственное разрешение составляет 0,1–0,2 м. На изображении такого качества отчетливо проявляются нюансы теплового следа продуктопровода, выделяются участки его обводнения грунтовыми водами (а значит, и повышенной коррозионной опасности), места развития гидратных пробок. При этом утечки из нефтепроводов обнаруживаются как радиационно-контрастные объекты (изменение спектральных характеристик почво-грунтов), а утечки из газопроводов — как температуроконтрастные (отрицательные аномалии теплового поля, сформированные за счет адиабатического расширения выходящего газа).

## 3. Задача определения глубины залегания одиночного продуктопровода

Возможно решение задачи определения глубины залегания этого продуктопровода (с относительной погрешностью, не превосходящей 15 %) при наличии априорных данных о диаметре трубопровода и сети эталонных наземных измерений (1 точка на 1–5 км) по данным тепловой ИК аэросъемки, выполненной с малых высот и с высоким пространственным разрешением. Результаты расчета могут быть представлены в виде графика в требуемом масштабе, а также в цифровом виде (рис. 4).

Различные варианты прокладки трубопроводов могут быть сведены к задаче для цилиндрической полости. Ее решение, полученное методом наложения полей, дается формулой Форхгеймера:

$$T(x, y) = T_0 + \frac{(T_1 - T_0)}{2} \left( \ln \frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{x^2 - (y - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right) \left( \ln \left( \frac{h}{r_0} \right) + \sqrt{\left( \frac{h}{r_0} \right)^2 - 1} \right)^{-1},$$

где  $T(x, y)$  — температура в точке  $(x, y)$ ,  $T_0$  — невозмущенная температура поверхности,  $T_1$  — температура трубопровода,  $h$  — глубина залегания до центра трубопровода,  $r_0$  — радиус трубопровода.

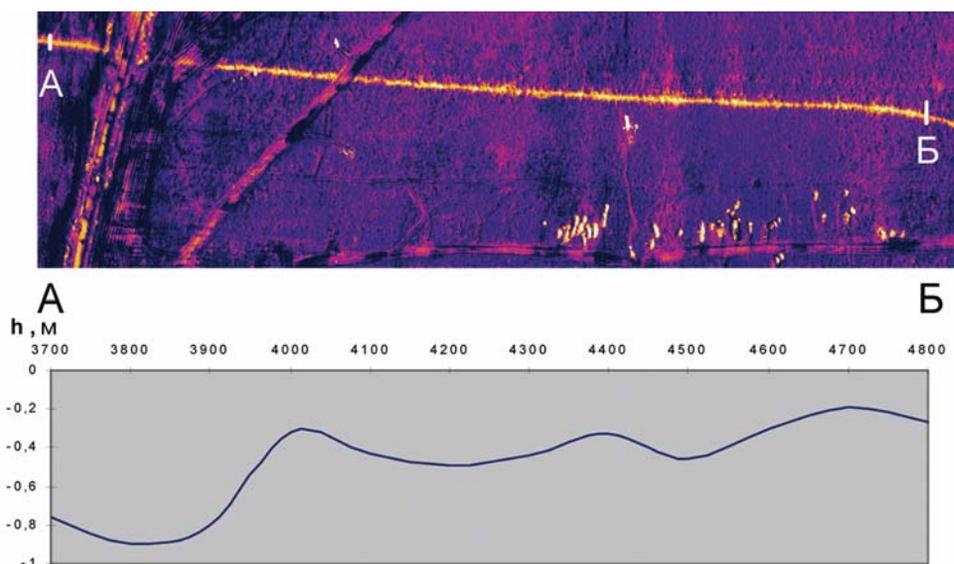


Рис. 4. Результаты расчета глубины залегания нефтепровода: А, Б — метки начала и конца на растровом инфракрасном изображении и на графике

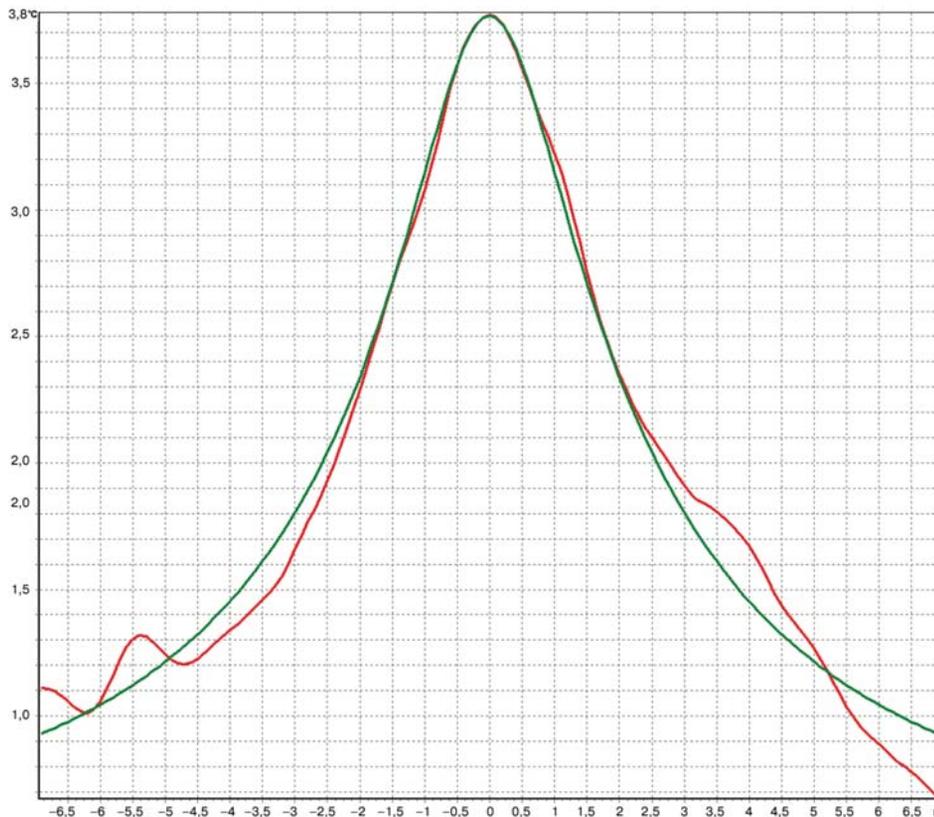


Рис. 5. Графики усредненной температуры (красный) и распределения Форхгеймера в минимальном экстремуме (зеленый)

Имея реальное усредненное на некотором интервале трубопровода распределение температуры  $\bar{T}(x)$ , методом координатного спуска производится минимизация суммы

$$\sum_{i=1}^N \frac{(T(x_i, 0) - \bar{T}(x_i))^2}{|x_i| + 1} \rightarrow \min.$$

вая ИК аэросъемка: картирование и диагностика тепловых сетей // Строительная инженерия. — 2005. — № 11. — С. 24–29, № 12 — С. 44–49.

© Скловский С.А., Панарин А.А., 2015

Скловский Сергей Александрович // sklov@aerogeo.ru  
Панарин Антон Александрович // obizor@gmail.com

Результатом минимизации является набор параметров  $T_0, T_1, h$ , при этом величина  $h - r_0$  и есть искомое значение глубины до поверхности трубы (рис. 5).

Резюмируя сказанное, отметим, что все материалы тепловой ИК аэросъемки в виде тематических растровых и векторных слоев интегрируются в специализированные и муниципальные геоинформационные системы и в итоге представляют собой исключительно эффективный инструмент анализа состояния объектов трубопроводной инфраструктуры, принятия технических, финансовых и управленческих решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антыпко А.И. Основы дистанционного теплового мониторинга геологической среды городских агломераций. — М.: Недра, 1992.
2. Пируева Т.Г., Скловский С.А. Методические аспекты дистанционного теплового мониторинга городских территорий и природных объектов // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 7. — С. 65–68.
3. Пируева Т.Г., Скловский С.А. Тепловая ИК аэросъемка: картирование и диагностика тепловых сетей // Строительная инженерия. — 2005. — № 11. — С. 24–29, № 12 — С. 44–49.

## ХРОНИКА

### К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АЛЕКСАНДРА ДМИТРИЕВИЧА ЕРШОВА (1905–1986)

А.Д. Ершов — видный ученый-геолог, организатор геологоразведочного производства и научных исследований в области геологии, родился 22 декабря 1905 г. в бедной крестьянской семье в далеком селе Венденга (бывшая Вологодская губерния). После окончания семилетки он поступил в педагогический техникум, который успешно окончил в 1926 г. В 1928 г. по путевке комсомола его направляют на учебу в МГУ. Вскоре он перешел в Московскую горную академию, а после создания на базе Академии Московского геологоразведочного института стал студентом МГРИ, который успешно окончил в 1932 г.



Еще в студенческие годы началось становление А.Д. Ершова как геолога-разведчика и исследователя. В 1931 г. он, в качестве прораба Слюдянкинской экспедиции Института

прикладной минералогии (с 1935 г. ВИМС), занимался поисками и разведкой в районе известных месторождений слюды на южном берегу Байкала и открыл крупную залежь флогопита. После успешного окончания МГРИ его в числе лучших выпускников оставили в аспирантуре.

Через год учеба прерывается, так как А.Д. Ершов постановлением Наркомтяжпрома переводится в Иркутск исполняющим обязанности зам. директора научно-исследовательского института (ВСНИГРИ). Лишь в 1934 г. он вернулся в Москву, где закончил аспирантуру, но уже в стенах Института прикладной минералогии (ныне ВИМС). Будучи аспирантом в составе экспедиций института, он работал на южном склоне Центрального Кавказа, изучая мышьяковые и полиметаллические месторождения. Однако защиту диссер-