

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВИЗОРА

### при геокриологических исследованиях

Сергеев Д.О., к.г.-м.н., Станиловская Ю.В., Савельев К.В.,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им.Е.М. Сергеева РАН  
К. Йошикава, Университет Аляски, Фейрбенкс, США  
К.В. Савельев, Международный независимый эколого-политологический университет, Москва

*В статье впервые показана возможность широкого применения тепловизоров при геокриологических исследованиях: состояния мерзлоты, в частности состояния повторно-жильных и пластовых льдов, термических просядок, условий теплообмена на поверхности, работы охлаждающих устройств и др. Представлены примеры термограмм, используемых в научно-производственных работах, которые могут быть применимы в учебном процессе университетов и школ.*

#### ТЕПЛОВИДЕНИЕ И ТЕПЛОВИЗОР

Возможности человеческих органов чувств ограничены, и все же благодаря техническим достижениям мы можем заглянуть за пределы видимого мира, увидеть незримое, например, температуру земной поверхности. Тепловое (или инфракрасное) излучение по своей природе аналогично свету, но не вызывает зрительного впечатления. Это – часть электромагнитного спектра в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,75\text{мкм} - 100\text{мкм}$  и более, которую мы воспринимаем как тепло. Инфракрасные лучи испускаются телами, имеющими температуру выше  $0^\circ\text{К}$ .

Полное количество энергии, излучаемое в единицу времени единицей излучающей поверхности, называют излучательной способностью  $E$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) инфракрасного (ИК) излучателя. Излучательную способность, отнесенную к ин-

тервалу длин волн  $d\lambda$ , называют интенсивностью излучения  $I$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{мкм}$ ).

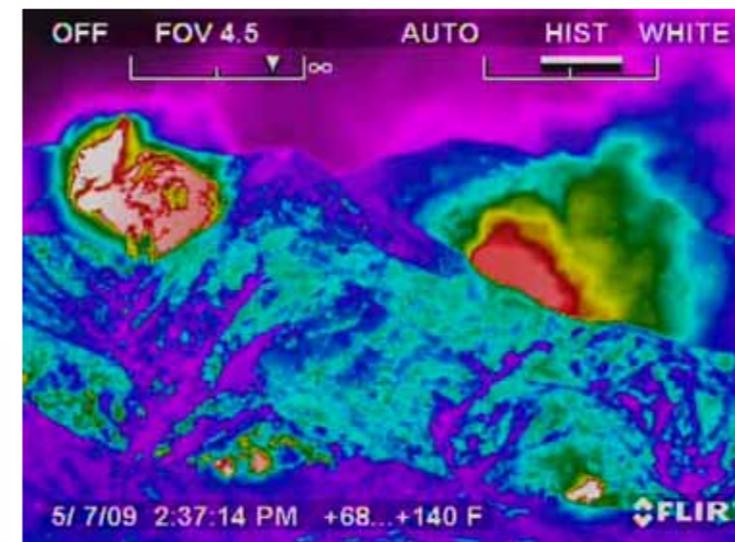
При одной и той же температуре поверхности излучательная способность реальных материалов меньше, чем излучательная способность абсолютно чёрного тела, что учитывается коэффициентом излучения  $\epsilon$ , который имеет различные значения: для гранита, чугуна  $\approx 0,45$ ; полированной меди, латуни, хрома  $\approx 0,05$ ; асфальта, стекла, льда  $\approx 0,9$ . Значения коэффициента излучения используются при расчёте температуры тела при известной излучательной способности.

Получение видимого изображения объектов по их собственному, либо отражённому от них инфракрасному излучению называют тепловидением. Оно открывает для исследователя то, что невозможно увидеть невооруженным глазом. ИК-камеры или тепловизоры фиксируют инфракрасное излучение и позволяют получить данные о темпера-

туре объекта дистанционно. Этот факт делает портативную ИК-камеру незаменимым инструментом в полевых и лабораторных исследованиях.

Термография появилась в прошлом веке. Примерно 30 – 40 лет назад она стала практически использоваться в военном деле, а также – в медицине. Тепловидение, как способ информации об окружающем мире, завоевывает все новые области применения. В настоящее время тепловидение имеет все основания стать одной из главных информационных технологий.

В технике тепловизоры нужны для того, чтобы контролировать передачу энергии, прочность деталей машин и механизмов, в частности, температурные напряжения, теплоизоляцию зданий и сооружений. В строительстве тепловизоры используются для контроля температуры асфальта и бетона, контроля энергопотерь (так называемый энергоаудит). В биологии – это исследование теплопродукции живых организмов и отдельных органов в зависимости от суточных и сезонных циклов. В медицине – диагностика сосудистых, воспалительных и опухолевых заболеваний, наблюдение за эффективностью лечения, экспресс-контроль при карантинных мероприятиях. Тепловизи-



*Авторы выражают благодарность компании ОАО «Пергам-Инжиниринг» за предоставленный тепловизор FLIR ThermaCAM T400 для использования в полевых работах в Северном Забайкалье в августе 2013 года. Особая благодарность коллеге А.Н. Угарову за советы и комментарии, которые улучшили данную статью.*



Рис. 1. Охлаждающие устройства внутри полотна автодороги на Аляске

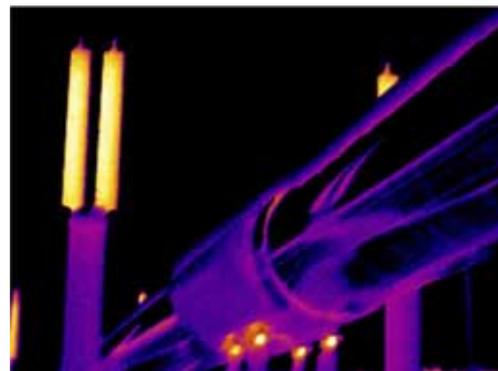
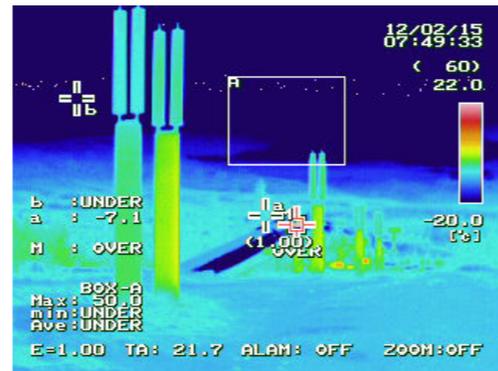


Рис. 2. Охлаждающие устройства, работающие эффективно (снимок слева) и неэффективно (снимок справа) вдоль линейных объектов



Безусловно всегда стоит учитывать метод исключения ошибок измерений.

### ТЕРМОГРАММЫ МЕРЗЛОТЫ

По определению мерзлота – это горные породы, температура которых остается ниже 0°C более двух лет. Из данного определения следует, что температура является важнейшей характеристикой мерзлоты, и её измерения являются инструментом изучения этой самой мерзлоты (рис.4).

ИК-камера представляет собой устройство, дистанционно фиксирующее инфракрасное излучение и преобразующее его в электронный сигнал, который обрабатывается и выводится на экран в виде

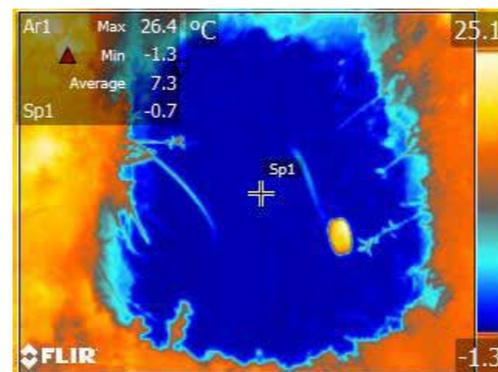


Рис. 4. Мерзлота в шурфе на глубине 20 см в Чарской котловине (август 2013 г.)

онная техника позволяет вести противопожарный мониторинг лесных массивов и торфяников, следить за состоянием вулканов. Тепловизор используют при поиске полезных ископаемых, при анализе утечки газа или нефти, вод в отопительных системах и теплотрассах, при анализе эффективности работы кондиционеров и охлаждающе-отепляющих установок, для определения источников подземных вод.

В последнее время активизировалось использование современных технических средств дистанционного зондирования, в том числе тепловизоров для геокриологических исследований при проектировании и мониторинге автомобильных и железных дорог (рис.1). С

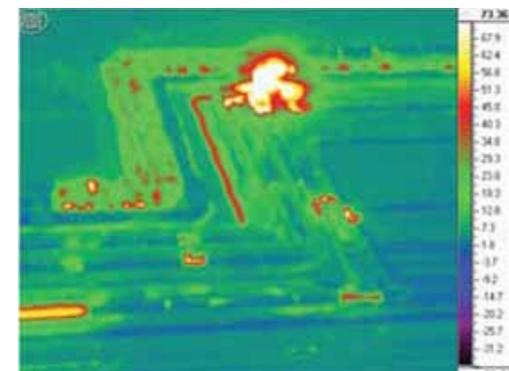


Рис. 3. Обследование газопроводов и систем температурной стабилизации грунтов на линейно-протяженных объектах в течение аэротепловизионной съемки (Стрижков, 2012)

2000 года специалисты БАМовской мерзлотной станции с помощью тепловизора оперативно определяют работоспособность охлаждающих установок и искусственных сооружений (рис.2), при аэротепловизионной диагностике – систем температурной стабилизации грунтов на линейно-протяженных объектах Сибири (рис.3) (Стрижков, 2012).

Применение тепловизора в геокриологии безусловно оправдано в двух основных случаях:

- для оценки контрастности «рисунка» температуры земной поверхности различных ландшафтов;
- для усреднённой оценки температуры поверхности горных пород (грунта) на участках, где контактные измерения затруднены или невозможны.



Рис. 5. Использование ИК-камеры (тепловизора) в полевых условиях при исследовании повторно-жильных льдов в обнажении р.Чара (август 2013 г.)

тепловизионного изображения (термограммы), включающего температурные данные объекта (рис.5). Полученная информация в виде термограмм подвергается количественному и качественному анализу, что позволяет увидеть тепловые свойства объекта на мониторе и обработать их с помощью специального программного обеспечения. Тепловизоры используются для определения распределения и изменения температуры в реальном времени, позволяя геокриологам увидеть и замерить относительное тепловое поле, термоконтракты, рассейвание, подземные льды и развитие термических просадок по ним.

Рассмотрим некоторые примеры использования компактных тепловизоров в геокриологии.

**Штольни, тоннели.** В 1984 году во время проходки Кодарского тоннеля случился обвал. Аварии можно было избежать при регулярном измерении температуры грунтов по всему периметру тоннеля, а не только по нижним отметкам. Оперируя термограммами, можно было бы вовремя принять необходимые меры по поддержанию температурного режима и креплению свода. Но для того, чтобы вести постоянные измерения температуры свода тоннеля, надо было бы организовать к нему доступ для периодического, достаточно частого измерения темпера-

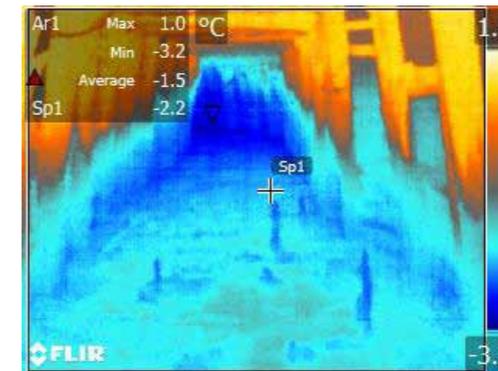


Рис. 6. Термограммы по периметру штольни в Удоканском хребте (август 2013 г.)

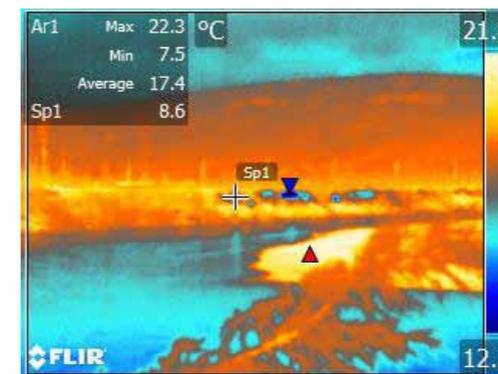


Рис. 7. Обнаружение повторно-жильных льдов в отложениях I надпойменной террасы р. Чара тепловизором на расстоянии 400 м (август 2013 г.)

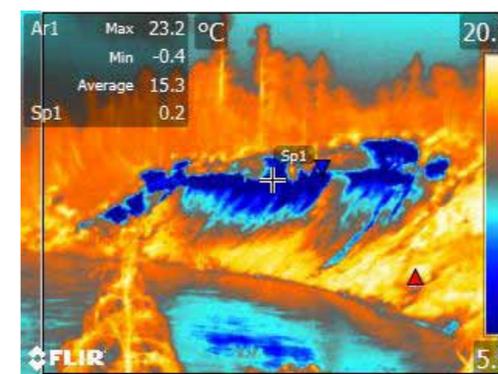


Рис. 8. Обнаружение повторно-жильных льдов в отложениях I надпойменной террасы р. Чара тепловизором на расстоянии 100 м (август 2013 г.)



туры, либо смонтировать и постоянно наращивать систему термодатчиков, закрепляемых на своде, связав их проводами с регистрирующей аппаратурой (В.Шилов,

1984). На рисунке 6 представлены термограммы штольни в Удоканском хребте, пройденной в условиях схожих с Кодарским тоннелем.

**Подземные льды.** Даже очень холодные объекты, такие как подземные льды, испускают инфракрасное излучение. ИК-камеры позволяют надежно обнаружить

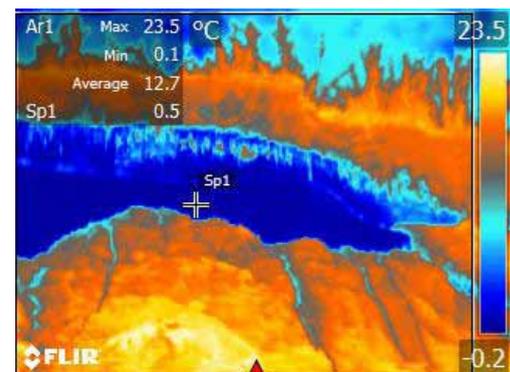


Рис. 9. Обнаружение повторно-жильных льдов тепловизором у подножия I надпойменной террасы реки Чара (август 2013 г.)

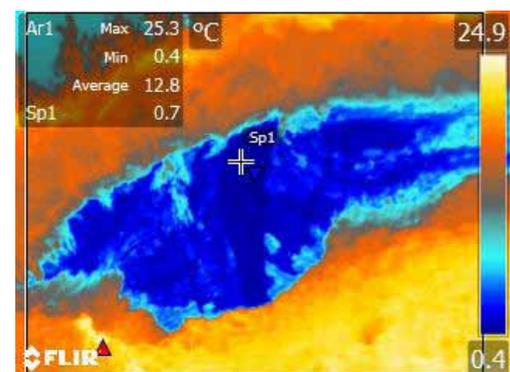


Рис. 10. Контрастное представление криогенных текстур с повторно-жильными льдами в обнажении I надпойменной террасы р. Чара (август 2013 г.)

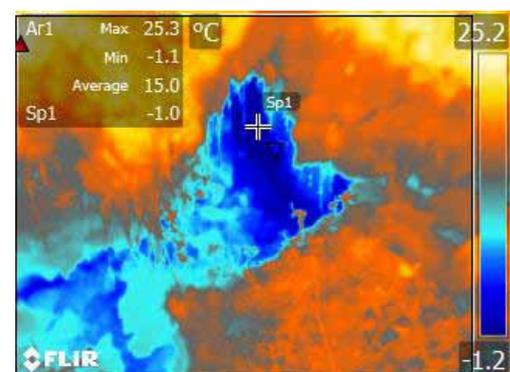


Рис. 11. Природная термическая просадка по повторно-жильным льдам на I надпойменной террасе р.Чара в удалении от автодороги (август 2013 г.)

повторно-жильные льды на расстоянии до 400-500 м и измерить температуру подземных льдов на локальных участках (рис.7, рис.8, рис.9).



При обработке термограмм можно получить контрастное изображение криогенных текстур (рис.10), которые на обычных фотографиях не заметны, и поэтому изображаются геокриологами в виде рисунка в полевом дневнике. Не каждый геокриолог обладает художественными способностями, к тому же погодные условия не всегда способствуют многочасовому зарисовыванию обнажения с высокочувствительными отложениями.

**Термические просадки земной поверхности.** Одной из прикладных задач изучения подземных льдов и высокочувствительных грунтов является выявление проблемных участков и их решение на линейных и площадных объектах, находящихся в мерзлоте. Тепловые просадки могут возникать как на антропогенном объекте, так и в природных условиях. Например, при протаивании повторно-жильных льдов, изображенных на рисунках 7-10, образовались термические просадки как в удалении от автодороги (рис.11), так и поперек ее полотна (рис.12).

Синим и голубым цветом на термограмме зафиксирован подземный лед и оттаивающая область вокруг него в просадке.

**Вулканы.** Тепловизор помогает ученым сократить время на выбор участка для бурения в поисках мерзлоты на вулканах, где потенциально может существовать мерзлота. Профессор Университета Аляски Кенджи Йошикава в течение трех лет проводил научные экспедиции на вершину самой высокой горы Африки – Килиманджаро (5985 м). Цель экспедиций является фундаментальной, и основная задача которых сводится к обнаружению мерзлоты именно в тропических широтах, где ее существование ранее не было обозначено. Выбран ряд высокогорий в тропической зоне, как правило это вулканы, на вершинах которых фиксируются отрицательные среднегодовые температуры воздуха и прочие условия, способствующие образованию мерзлоты. В ночное время на термограмме можно увидеть несколько теплых участков (рис.13). Температура в

кратере составляет более 30°C (красно-оранжевый цвет). Даже температура поверхности кратера синего цвета высокая порядка 10-20°C. Таким образом, тепловизор помогает быстро установить места, где мерзлота не может существовать, несмотря на среднегодовую температуру воздуха на вершине вулкана равную -6°C (Permafrost in our time, 2013).

## ТЕРМОГРАММЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСЛОВИЙ ТЕПЛОБМЕНА

Рассмотрим некоторые термограммы, полезные для анализа теплопередачи в горных породах и окружающей среде (рис. 14, рис.15).

**Склоновые отложения.** На участках несомкнутой растительности (курумы, полярные пустыни, барханы развееваемых песков) тепловизор даёт данные о разбросе значений температуры дневной поверхности, что весьма ценно для калибровки моделей температурного режима горных пород (рис.16).

Перспективно также использование тепловизора при изучении горных выработок и природных пористых тел (в частности, курумов), существенно меняющих характеристики температурного поля горных пород. Контраст температуры на поверхностях с растительностью и на глыбах куру-

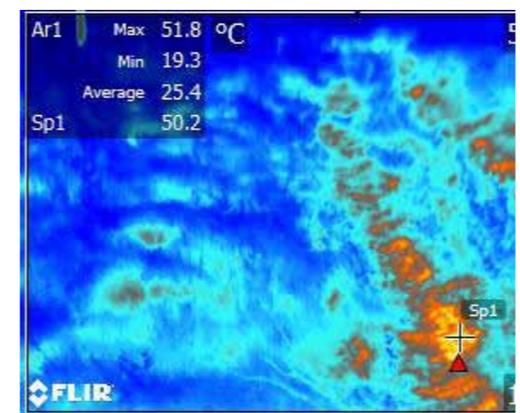


Рис. 14. Дорожная колея – источник нарушения условий теплообмена на поверхности (август 2013 г.)

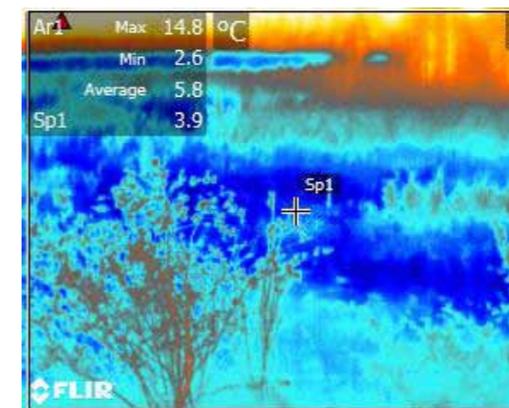


Рис. 12. Термическая просадка по повторно-жильным льдам на I надпойменной террасе р.Чара, граница с автодорогой и развивающаяся на ее насыпе (август 2013 г.)

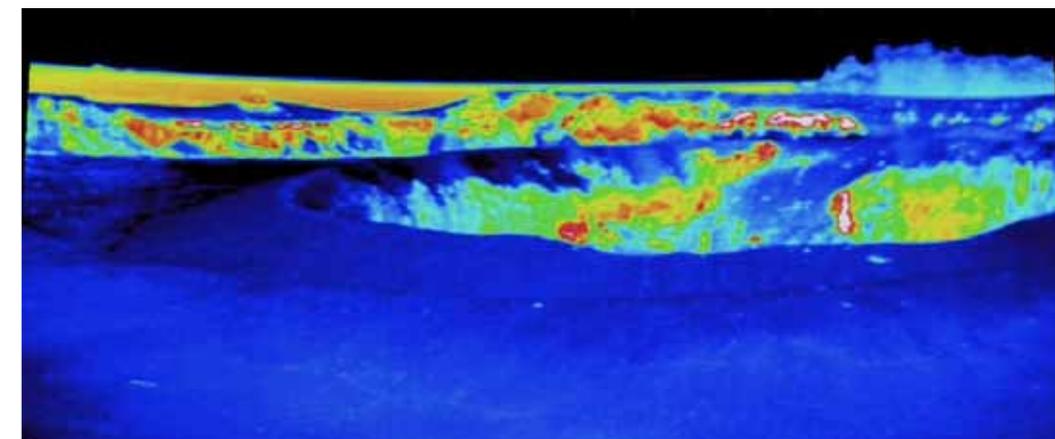


Рис. 13. Теплые участки в районе кратера вулкана Килиманджаро (сентябрь 2012 г.)

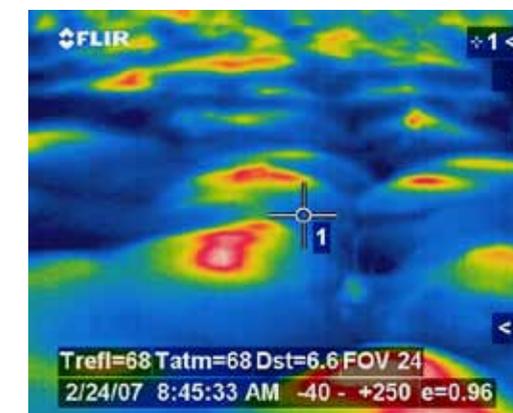


Рис. 15. Конвективный теплообмен в пределах кочкарниковой тундры Аляски (февраль 2007 г.)

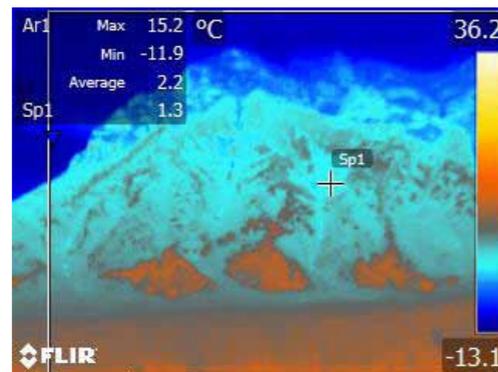
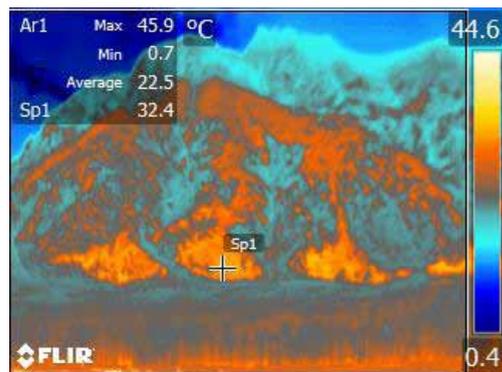


Рис. 16. Склоновые отложения хребта Кодар (снимок слева - 03/08/2013 и снимок справа - 05/08/2013)

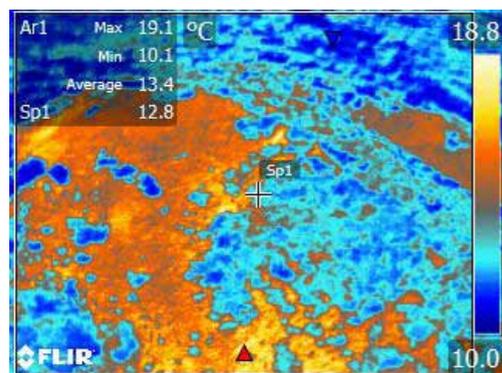


Рис. 17. Контраст температур поверхности склоновых отложений (тёплые участки соответствуют курумам) хребта Удокан (август 2013 г.)

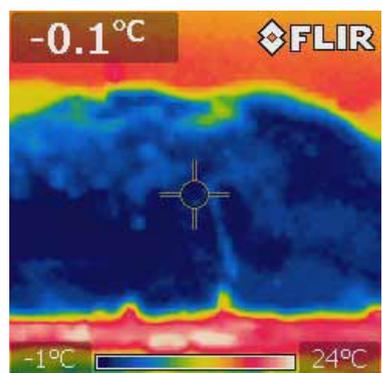


Рис. 18. Загрязненный снежник на окраине города Южно-Сахалинска (автор Лобкина В.А.)

мов виден на термограммах (рис.17). Интересно, что на термограмме курумы теплее, хотя они обладают охлаждающим эффектом, и температура курумов на 2°C ниже, чем окружающих грунтов. С помощью

тепловизора возможно измерять конвективный потоков воздуха серией кадров, на которых будет заметно движение воздуха. **Снежники.** Складирование больших объемов загрязненных снежным масс,

убираемых с улиц города Южно-Сахалинска, привело в формированию многолетних снежников на окраине города (рис.18), приравняемых к категории отходы (Лобкина, Генсиоровский, 2012). Существование этого снежника ведет к образованию мерзлоты, что не свойственно природным условиям южного Сахалина. Можно определить направление стока загрязнённых талых вод и сделать прогноз загрязнения прилегающей к свалке территории и водных объектов. Тепловизор фиксирует отрицательную температуру. Это значит, что за летний период не хватает тепла, чтобы изменить состояние снега. Таковы условия теплообмена на поверхности. С помощью тепловизора эти условия можно установить точно.

**Вихревые структуры.** Циклонические вихревые структуры (водовороты, конвективные ячейки) – вихри, вызванные циркуляционными движениями были обнаружены в одном из бочагов кочкарника в Чарской котловине в августе 2013 г. (рис.19). Глубина бочага порядка 1,4 м, на дне слой мягкого ила в 10 см, под илом многолетний мёрзлый грунт. Ширина вихрей 5-7 см. По видимому, мы наблюдаем смешение вод с разной температурой. Более холодный поток внедряется в тёплую воду. Это либо поверхностный сток и конвективные ячейки, либо апвеллинг. Неизвестно, имел ли место дополнительный прогрев водорослей и других простейших на поверхности водоёма, и были ли они в достаточном количестве, чтобы их собственная температура сказалась на результате измерения. Максимальная разница между тёплым и холодным потоком составляет 0,9 градуса. Ринги, синоптические и спиральные вихри в поле температуры поверхности океана хорошо видны на снимках из космоса, полученных в инфракрасном диапазоне спектра (рис. 19). Вихри могут быть также обнаружены на поверхности океана по температурным фронтам на их периферии: в интенсивных вихрях перепад температур может составлять 0,5-3°C. Вихри и вихревые структуры могут быть выявлены по пониженной или

повышенной температуре морской поверхности в ИК-диапазонах (ИК-радиометры: AVHRR) (<http://oceanfromspace.scanex.ru>).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почему интересно узнать все возможности, которыми обладает ИК-камера, при исследовании мерзлоты?

Представленные примеры термограмм, используемых в научно-исследовательских и производственных работах, показывают широкие возможности применения тепловизоров в геокриологических исследованиях. Становятся возможными комплексные исследования, состоящие в обнаружении мерзлоты, фиксации формы и размеров подземных льдов, определения температурного поля.

Важно, что эти данные о мерзлоте могут сочетаться с возможностью изучения конвективного теплообмена (обнаружение конвективных потоков воздуха в горных выработках и природных пористых телах, в частности, в курумах).

Практическую ценность имеет контроль работы охлаждающих устройств.

Пока в стороне остаётся важный вопрос об определении температуры поверхности для расчёта теплового баланса почвы с атмосферой в естественных и нарушенных условиях. Но представляется, что в сочетании с актинометрическими и микрометеорологическими наблюдениями использование тепловизора существенно

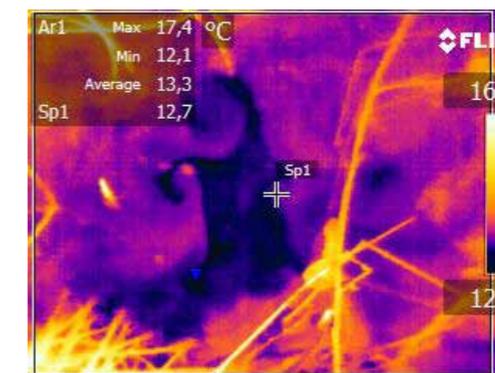


повысит точность расчёта.

Помимо использования тепловизоров в практике возможно их использование для фундаментальных исследований в лабораторных условиях. Например, изучение процессов промерзания-протаивания грунтов или изучения бактерий мерзлоты помогут ответить на давно поставленные вопросы и заставят задуматься о новых.

Наглядная визуализация температуры на термограммах, получаемых тепловизором, помогает усовершенствовать обучение студентов.

Термограммы отражают различные картины мерзлотных проявлений. Технический специалист, работающий с тепловизором на заводе, не сможет предсказать и объяснить температурные «интересности» для геокриолога, но в то же время геокриологу, как исследователю природных процессов, сложно учесть все рекомендации по правильной тепловизионной съемке, поскольку объектом изучения геокриолога является природа с большим набором условий и факторов, формирующих температуру мерзлоты. Проблемы возникают, в частности, с «ночной жизнью» геокриолога, желающего получить корректные снимки, отражающие точную температуру земной поверхности без влияния солнечной активности. Это сделать бывает весьма сложно, ввиду временных интервалов охлаждения земной поверхности (ночью) и погодных условий (дождь, туман), поэтому в статье представлены в



основном снимки, сделанные в дневное время. Геокриологи должны быть уверены, что тепловизионный метод изучения мерзлоты приведет к расширению возможностей изучения температурного состояния мерзлоты и не приведет к ошибочному анализу и выводам, сделанным на основе некорректно снятых и проинтерпретированных термограмм. Вышеуказанные примеры показывают, что при соответствующем подходе к проблеме использования тепловизора в геокриологических исследованиях высказанные трудности могут быть преодолены.

## Литература

1. Лобкина В.А., Генсиоровский Ю.В. Проблемы размещения снежных полигонов на урбанизированных территориях (на примере г. Южно-Сахалинска) // Вестник ДВО РАН, Владивосток: Издательство «Дальнаука» ДВО РАН, № 3, 2012. с. 97-102.
2. Стрижков С.Н., Загребнев А.С. Аэротепловизионные исследования систем температурной стабилизации грунта на объектах трубопроводного транспорта // Трубопроводный транспорт, №4 (32), 2012, с.8-12.
3. Шилов В. Где задержалась бригада Варшавского // газета «Советская Россия», 3 июня 1984.
4. Permafrost in our time. Edited and compiled by Kenji Yoshikawa. University of Alaska Fairbanks Permafrost Outreach Program, 2013, pp.300.

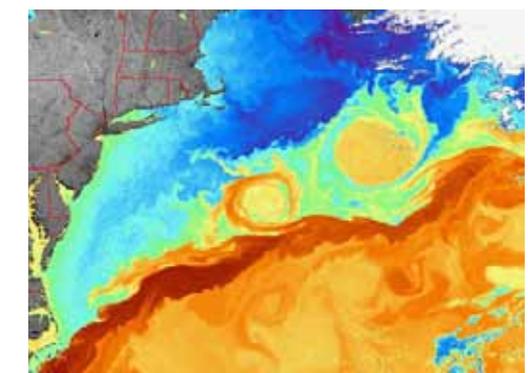


Рис. 19. Вихревые структуры на термограмме и тёплые ринги Гольфстрима на спутниковом снимке (справа)