
**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 550.836.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ПОЖАРА УГОЛЬНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАССИВНЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ**

© 2016 г. А. А. Гурулев, Р. А. Филенко, С. В. Цыренжапов

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
ул. Недорезова, 16а, а/я 521, г. Чита, 672014 Россия. E-mail: lgc255@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.08.2015 г.

После исправления 09.10.2015 г.

Предложена методика дистанционного обнаружения близповерхностных угольных пожаров, которая опирается на регистрацию собственного теплового излучения в СВЧ-диапазоне. Дано теоретическое обоснование возможности выявления подземных пожаров. Выполнены СВЧ-радиометрические измерения, которые зафиксировали подземный пожар на угольном месторождении в Забайкальском крае. Показана возможность определения горения небольших объемов угля на глубинах порядка единиц метров.

Ключевые слова: СВЧ-радиометрия, подземный угольный пожар.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из геоэкологических проблем, возникающая при добыче полезных ископаемых на некоторых месторождениях, — способность углей к самовозгоранию как при открытом, так и подземном способе отработки [9, 11, 17]. Подземное горение углей известно на многих месторождениях мира. Возникают они под воздействием как природных, так и антропогенных факторов, могут охватить большую площадь и продолжаться много лет. Самый старый из известных горящих месторождений угля — Горящая гора (Burning Mountain) в Австралии, где подземный пожар длится по некоторым оценкам уже 6000 лет. Подземное горение угля на Фан-Ягнобском месторождении в Таджикистане продолжается около 2000 лет [8].

Опыт показывает, что подземные пожары несут значительный экономический и экологический ущерб. Затраты на тушение таких пожаров также велики и не всегда эффективны, так как существует вероятность возникновения новых очагов горения. Поэтому контроль за термическим состоянием горных пород — важное мероприятие для минимизации ущерба от подземного горения угольных месторождений. Определение площади подземных горений углей прямыми измерениями на практике оказывается довольно сложной задачей.

В настоящее время для диагностики процессов, протекающих в приповерхностных слоях земной коры, широко применяются дистанционные методы зондирования земных покровов. Так, например, по тепловым аномалиям на поверхности земных покровов можно судить о предстоящем землетрясении [6]. Для этих целей используется тепловой инфракрасный диапазон (ИК-диапазон на длинах волн 7–14 мкм) при спутниковых измерениях. Однако недостатком данного диапазона является то, что ИК-излучение формируется лишь в самых верхних слоях горных пород, которые составляют всего несколько микрометров. Кроме того, ИК-излучение не распространяется в атмосфере при наличии облачности и тумана. Более информативен по этой причине — СВЧ-диапазон. Излучение в данном диапазоне слабо затухает в атмосфере, проникает в земные покровы на глубины до единиц и десятков метров, и может быть использовано для подповерхностного зондирования. Различают два вида зондирования с использованием электромагнитных волн: активное и пассивное. При пассивном зондировании используют как излучение, отраженное от объекта (обычно солнечное излучение), так и собственное тепловое излучение, спектральная интенсивность которого определяется законом излучения Планка. Для температур, характерных для поверхности Земли, это излу-

чение простирается от ИК-диапазона до радиодиапазона, включая СВЧ-диапазон. При этом интенсивность излучения прямо пропорциональна термодинамической температуре объекта в некотором эффективном излучающем слое. Тепловое излучение в СВЧ-диапазоне (метод СВЧ-радиометрии) позволяет определять температуру приповерхностных структур на глубинах до нескольких метров. Например, в работах [2, 3, 5] показано, что по интенсивности собственного радиотеплового излучения в сантиметровом участке СВЧ-диапазона можно регистрировать различного типа включения в пресном ледяном покрове в слое до 1.5 м. Следовательно, при повышении температуры льда в локальных структурах можно, в принципе, определять такие области на глубинах в несколько метров. То же для слабонасыщенных водой промерзающих горных пород, так как поглощение излучения в СВЧ-диапазоне слабое для льда и повышается приблизительно в 1000 раз в жидкой воде.

Для регионов земного шара, расположенных в арктической и субарктической зонах, характерно глубокое сезонное промерзание горных пород. К их числу относится и малоснежное Забайкалье, где в зимний период времени грунты промерзают до глубины 5 м [10]. Поэтому радиоволновые бесконтактные способы измерения повышения температуры грунтов с использованием СВЧ-радиометрии в зимнее время, когда из-за его промерзания глубина зондирования возрастает, может существенно упростить эту задачу. СВЧ-радиометры широко используются при измерениях со спутников, их можно устанавливать на автомобили, летательные аппараты, что позволяет оперативно обследовать труднодоступные районы.

Цель настоящей работы – исследовать возможности метода СВЧ-радиометрии для выявления тепловых аномалий, связанных с подповерхностным горением углей на глубинах до 100 м.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований выбран участок, где известно горение пластов бурого угля, находящийся в 1.5 км к юго-западу от пос. Рудник Кадала (Забайкальский край) в одном из заброшенных карьеров (рис. 1). В 2 км к востоку от подземного пожара находится взлетно-посадочная полоса аэропорта Кадала (г. Чита). Визуально подземный пожар хорошо фиксируются в зимнее время по отсутствию снежного покрова), парящим газовым струям, выходящим из свежих трещин, обрушениям грунта, а также изменению его цвета вслед-

ствие обжига или появления налета новообразованных минералов на поверхности [12].

Горящие пласты расположены на северо-восточном фланге Черновского буроугольного месторождения, которое приурочено к мульдообразной структуре северо-восточного простирания площадью 90 км². Пласты угля падают к центру мульды под углом 7–8°. Угленосная толща позднеюрско-раннемелового возраста сложена переслаивающимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами с общей мощностью около 150–170 м. Выделено 12 угольных пластов, мощностью от 0.1 до 11 м [15].

Зона современного горения пластов угля имеет протяженность около 250 м с севера на юг вдоль борта старого угольного карьера. В пределах этой зоны наблюдаются процессы ступенчатого проседания грунта, а из образовавшихся трещин и провалов фиксируются выходы горячих струй пара и дыма, похожие на вулканические фумаролы. На краях и стенках трещин или на поверхности тлеющего пласта угля наблюдается отложение новообразованных минералов в виде налетов и кор [13]. Толща горячей зоны составляет 2–3 м, при этом она постоянно смещается по пласту угля со скоростью около 1.5 м в год.

Недалеко от места выхода горящих пластов проходит автодорога (см. рис. 1). Горение углей происходит и под ней. Длительные регулярные наблюдения показывают, что асфальтовое покрытие этой дороги постоянно разрушается вследствие проседания грунта.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ПОЖАРОВ

Как отмечено выше, жидкая вода создает значительное затухание излучения в СВЧ-диапазоне по сравнению со льдом. Поэтому оценки глубины обнаружения пожара были выполнены для замерзающих грунтов, когда концентрация жидкой фазы в них достигает минимума. Определение близповерхностного пожара в радиометрическом режиме в СВЧ-диапазоне в зимнее время базируется на том, что радиотепловое излучение промерзшего грунта по сравнению с талым формируется в более протяженном слое, толщина которого примерно равна значению скин-слоя (l) [18]. Скин-слой – это слой среды, в котором электромагнитные волны уменьшаются по напряженности поля в e раз (e – основание натурального логарифма, численно равное приблизительно 2.718).

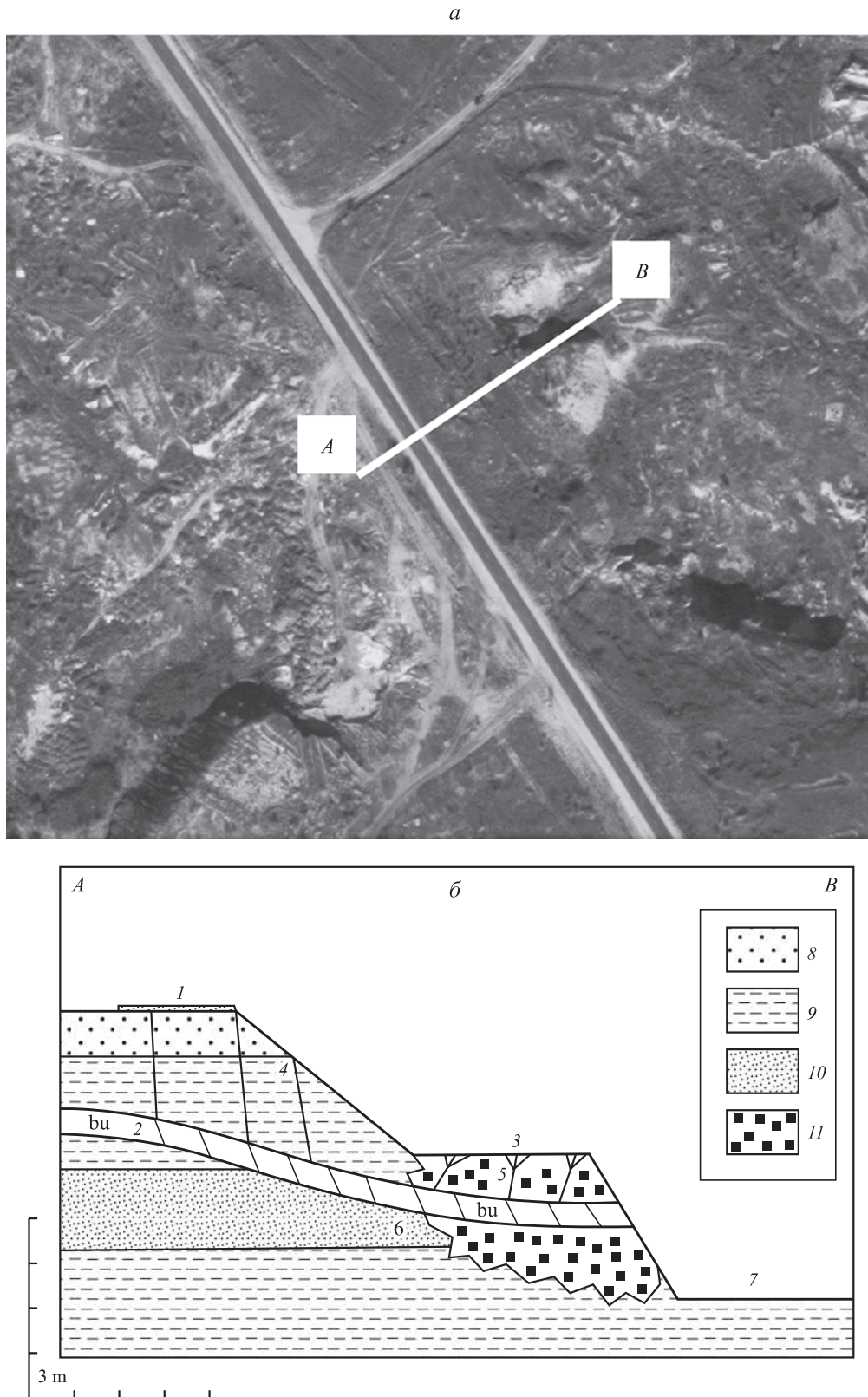


Рис. 1. Карта (*a*) и разрез (*б*) по линии *A–B* участка подземного пожара: 1 – автомобильная асфальтированная дорога, 2 – негорящий пласт бурого угля, 3 – фумарольное поле, 4 – видимые трещины в массиве пород, 5 – фумарольные каналы, 6 – горящий пласт бурого угля, 7 – заброшенный карьер; 8–11 – горные породы: 8 – конгломерат, 9 – алевролит, 10 – песчаник, 11 – горелые породы (глиежи, паралавы).

Для слабопоглощающих сред он определяется по формуле

$$l = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon'}}{\pi \cdot \epsilon''}, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, ϵ' , ϵ'' — действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ($\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$). В свою очередь ϵ' , ϵ'' зависят от таких параметров, как длина волны и температура.

Если среда неоднородна и состоит из различных веществ, например, песка и воды, то для определения диэлектрических параметров необходимо использовать формулы для смесей. Для увлажненных грунтов часто применяется “рефракционная” модель (модель Брауна) [14]. Диэлектрическая проницаемость увлажненного грунта

$$\sqrt{\epsilon_i} = \rho_w \sqrt{\epsilon_w} + (1 - \rho_w) \sqrt{\epsilon_c}, \quad (2)$$

где ϵ_i , ϵ_w , ϵ_c — комплексная диэлектрическая проницаемость смеси, воды и сухого грунта, соответственно; ρ_w — относительная объемная концентрация воды, определяемая отношением объема воды, содержащейся в грунте, к объему влажного грунта.

При расчетах скин-слоя грунтов значения действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости для сухого грунта принимались соответственно $\epsilon' = 3.5$ и $\epsilon'' = 0.014$ [14]. Для воды эти параметры существенно зависят от длины волны и температуры [16]. При расчетах температура грунта и соответственно находящейся в нем воды принималась равной -5°C .

Известно, что вода в порах нанометровых размеров не замерзает до температур около -100°C [4], поэтому даже в мерзлых грунтах имеется некоторое количество жидкой воды. Ее содержание может достигать единиц процентов в глинистых грунтах.

Для расчетов зависимостей скин-слоя грунта использованы значения объемной влажности 0, 1 и 2%. Результаты для различных длин волн показаны на рис. 2. Значения влажности около 1% характерны для глинистых грунтов при отрицательных температурах [14]. Как видно из графиков, скин-слой при низком содержании влаги в нем в сантиметровом диапазоне достигает нескольких метров, а для дециметрового диапазона — 10 м. При обычной влажности грунта и положительных температурах (порядка десятков процентов) скин-слой составляет значения ~ 0.1 – 0.2 м.

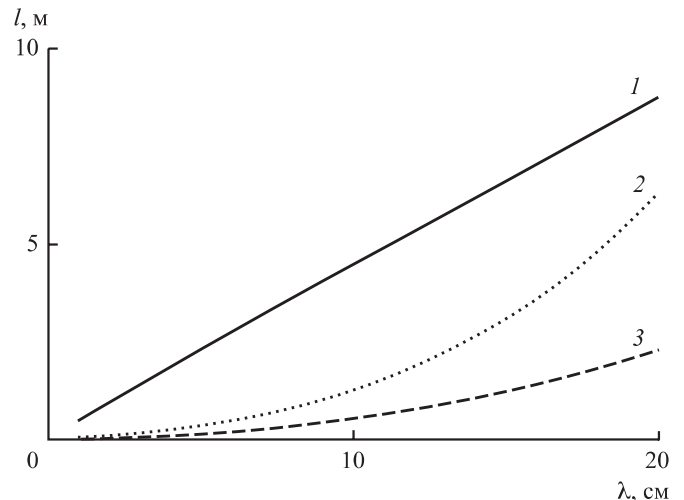


Рис. 2. Зависимость скин-слоя (h) от длины волны (λ) для грунта с объемной концентрацией воды, находящейся при температуре -5°C : 1 — 0%; 2 — 1%; 3 — 2%.

Таким образом, можно сделать вывод, что слой грунта, который выморожен, формирует радиотепловое излучение со значительно больших глубин по сравнению с излучением в инфракрасном диапазоне. Поэтому появляется возможность выявлять температурные аномалии в приповерхностных слоях до глубин порядка десятков метров при передаче тепла в верхние слои. Эта принципиальная особенность использована в настоящей работе.

Для оценки эффективности предлагаемого способа необходимо рассчитать среднюю температуру грунта в скин-слое для определенного тепловыделения при подземном пожаре. Приращение температуры этого слоя ΔT должно превышать флуктуационный порог чувствительности δT современных микроволновых радиометров. Это значение составляет приблизительно 0.01 К для времени интегрирования 1 с [18].

Расчет температурного поля подземного пожара был выполнен с использованием метода зеркального отображения [7]. Для расчетов приняты следующие исходные данные: глубина предполагаемого подземного пожара — 6 м; горение углей происходит в центре шара; за 1 час в центре шара сгорает 2 кг угля; теплотворная способность углей — 4100 ккал/кг (по данным [15]); плотность углей — 1300 кг/м³. Теплопроводность пород принята равной 2 Вт/(м · К). Результаты расчетов представлены на рис. 3. Из графика видно, что на расстоянии от центра подземного пожара в 1 м приращение температуры горных пород достигает 2°C . На поверхности, т.е. на расстоянии 6 м, изменение температуры не превышает 0.2°C . Если

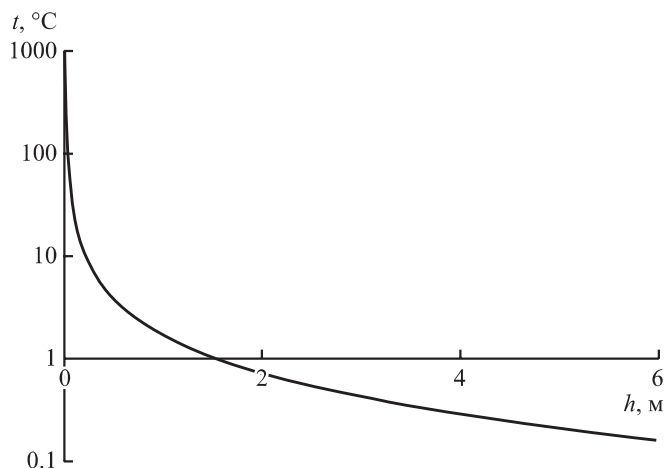


Рис. 3. Распределение приращения температуры грунта по высоте при точечном источнике выделения тепла.

принять значение скин-слоя 1 м, то среднее значение повышения температуры в слое $\sim 0.3\text{--}0.4^\circ\text{C}$.

В силу линейности уравнения Лапласа, в общем случае определяющим стационарные температурные поля, для них выполняется принцип суперпозиции, следовательно, для системы, состоящей из нескольких нагретых сферических тел с близко расположенными центрами, градиент температурного поля будет являться алгебраической суммой градиентов температурных полей для этих сферических объектов по отдельности [7]. Поэтому увеличение числа очагов подземного

горения углей приведет к пропорциональному увеличению температуры на поверхности грунта. Если линейные горизонтальные размеры горящего слоя увеличить в 10 раз (число очагов в 100 раз больше), то это приведет к возрастанию температуры поверхности в 100 раз для рассматриваемого случая. Поскольку тепловой поток на удалении от центра шара спадает обратно пропорционально площади сферической поверхности $\sim \frac{1}{R^2}$

(здесь R – расстояние от источника тепла, близкого к точечному), то для последнего случая повышение температуры на 0.2°C в скин-слое будет соответствовать глубине горения 60 м. Следует отметить, что контраст температуры даже порядка 10°C практически сложно зарегистрировать существующими методами ИК-радиометрии при наличии слоев снега, густой травы и при ветровом воздействии на поверхность.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Ввиду того, что в зимний период вблизи г. Чита грунт промерзает на глубину 2.5 м, среднее эффективное значение температуры грунта будет регистрироваться СВЧ-радиометрами в слое от 0.5 до 2.5 м в зависимости от длины волны. Для рассматриваемого выше примера она составит около $0.3\text{--}0.5$ К и не будет зависеть от скорости



Рис. 4. Радиометрический комплекс, установленный на автомобиль.

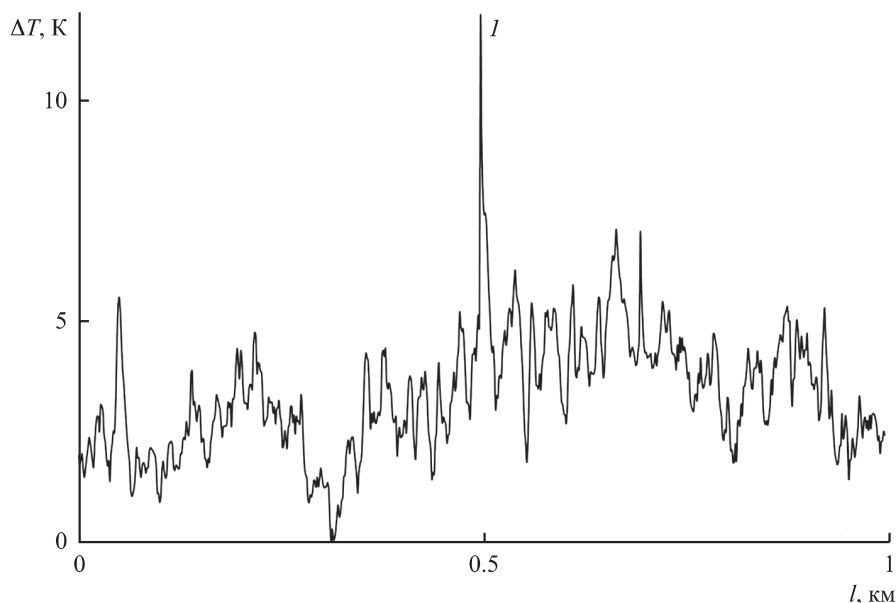


Рис. 5. Пример трассовой записи приращения радиояркой температуры на длине волны 2.3 см по автомобильной дороге. В точке *I* выделена область повышенного значения радиояркой температуры.

ветра, а также наличия снежного покрова, который практически слабо поглощает излучение при толщине снежного покрова до 0.5 м.

Для проверки теоретических оценок обнаружения подземного пожара в зимний период были выполнены натурные измерения. На автомобиль высокой проходимости «Нива» устанавливался радиометр, регистрирующий мощность собственного теплового излучения объекта в сантиметровом диапазоне на длине волны 2.3 см (рис. 4). Для измерения радиояркой температуры, характеризующей мощность радиотеплового излучения, использовали радиометр (чувствительность прибора – 0.1 К при постоянной времени 1 с; ширина диаграммы направленности антенны – 15°), калибровка которого осуществлялась по излучению безоблачного неба и эталона черного тела. Запись выходного сигнала с радиометра выполнялась на компьютер с помощью системы сбора данных фирмы «Agilent».

Были выполнены трассовые проезды по асфальтированной дороге, проходящей над участками с подземным горением углей. Вне дороги измерения удалось осуществить только на некоторых участках. Антенны радиометра ориентировались под углом ~45° к вертикали, площадь обмеряемого участка земной поверхности составляла значение порядка 1 м².

Кроме того, определяли температуру поверхностного слоя почвы с помощью ИК-пирометра. В одной из точек подземного пожара на склоне, где по трещине выходили на поверхность горя-

чие газовые струи из зоны угольного пожара, температура в районе трещины достигала 400°С. Осуществить СВЧ-радиометрические измерения в этой точке не представилось возможным из-за большой крутизны склона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований получены СВЧ-радиометрические данные, представленные на рис. 5. При трассовых проездах было выявлено повышение значений радиояркой температуры на одном из участков, которое по мнению авторов связано с существованием подземного горения. Причем измеренная с использованием пирометра поверхностная температура микронного слоя дорожного покрытия на этом участке не отличалась от фоновой температуры. Установлено, что в этом месте дорога периодически оседает, и ее постоянно ремонтируют.

Как видно из графика рис. 5 естественные вариации радиояркой температуры при трассовой записи составили 3°К. Очевидно, это связано с изменениями излучательной способности исследуемой поверхности и изменениями угла наблюдения, т.е. из-за наклона площадок, к которым чувствительна СВЧ-радиометрия. При вертикальном зондировании, влияние наклона обмеряемых площадок (при углах отклонения нормалей от среднего значения ±10°) этот эффект исчезает [14, 18]. Такие вариации могут маскировать участки разогрева грунта. Однако в некото-

рой точке (на графике отмечено "1") наблюдается выброс значения радиояростной температуры до 13 К. Данный выброс можно объяснить тем, что в этом месте расположена трещина, по которой выходят газообразные, нагретые продукты горения. В результате наблюдается заметное нагревание области массива горных пород вокруг места выхода горячих газов. При этом визуальную трещину в объекте практически не видно.

Можно полагать, что в зоне развития подземного пожара в массиве горных пород образуется большое количество просадок, сопровождающихся развитием сети трещин, по которым к дневной поверхности поднимаются газовые струи с высокой температурой. Эти трещины обеспечивают локальный нагрев поверхности почвы, а также вдоль вертикальных линий и на некоторой глубине. Данную особенность можно использовать для дистанционного обнаружения термических подземных аномалий при радиотепловых измерениях для случая более глубокого горения угля (до 100 м). Для их идентификации желательна построение карты радиоярости поверхности.

Экспериментальными исследованиями с помощью трассовых измерений вне дороги были выявлены тепловые аномалии, которые не регистрировались пирометром, определяющим температуру в инфракрасном диапазоне. Однако при больших значениях радиояростной температуры, которая достигала 380 К (приращение ~100 К), наблюдалось и повышенное значение температуры, определенное при ИК-измерениях. Приращение по ИК-измерениям составляло значение 10°C от фонового значения температуры. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что микроволновая радиометрия регистрирует приращение температуры не менее, чем на порядок больше, чем в случае ИК-измерений. В ряде случаев ИК-измерения не позволяли определить наличие нагретых участков.

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение возможности регистрации подземных пожаров, с использованием радиометрических измерений в сантиметровом диапазоне, которые затруднительно определить другими известными способами. Данный метод определения горения углей может быть эффективно осуществлен в зимний период времени особенно в тех местах, где промерзание горных пород достигает несколько метров. Желательна установка аппаратуры на небольшие летательные аппараты для выполнения измерений на труднодоступных объектах [1] и для построения тепловых карт по-

верхности, позволяющих определить, как структуру области горения, так и повысить глубину определения пожаров.

ВЫВОДЫ

В результате исследования можно сделать следующие выводы.

1. По интенсивности собственного теплового излучения в СВЧ-диапазоне можно определять подземные пожары и выявлять их динамику при непрерывном мониторинге в зимний период времени при их проявлениях на глубинах порядка 10 м.

2. В некоторых случаях при интенсивном горении или при выделении горячих газов по трещинам в массиве пород возможна регистрация пожаров на глубинах ~100 м и более.

3. Оптимальные длины электромагнитных волн для регистрации подземных пожаров лежат в дециметровом диапазоне ввиду того, что тепловое излучение в этом диапазоне формируется с больших глубин. По сравнению с сантиметровым диапазоном в дециметровом диапазоне глубинность определения пожаров приблизительно на порядок выше.

4. Для оперативного наблюдения за состоянием подземного горения возможно использование низколетящих аппаратов, например, дельталетов или других видов воздушных средств, и построение карт радиоярости земной поверхности.

5. Вариации излучательных характеристик в СВЧ-диапазоне на неоднородных участках поверхности могут ухудшить глубину обнаружения. Этот эффект можно компенсировать при построении карт радиоярости поверхности и при измерениях в надир (при ориентации оси антенны вертикально вниз или в пределах углов $\pm 10^\circ$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Лукьянов П.Ю., Цыренжапов С.В. Приземные микроволновые радиометрические измерения ледяного покрова оз. Байкал // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 91–99.
2. Бордонский Г.С. Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоемов. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1990. 104 с.
3. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов

- с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 210–215.
4. *Бордонский Г.С., Орлов А.О.* Исследование сегнетоэлектрических фазовых переходов воды в нанопористых силикатах при совместных электрических шумовых и калориметрических измерениях // *Физика твердого тела*. 2014. Т. 56. № 8. С. 1575–1582.
 5. *Гурулев А.А., Крылов С.Д.* Использование радиотеплового излучения для контроля за загрязнением дельты реки Селенги // *География и природные ресурсы*. 2004. № 1. С. 72–75.
 6. *Жуков Б.С., Хале В., Шлоттхауэр Г., Эртель Д.* Пространственно-временной анализ тепловых аномалий как предвестников землетрясений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 2. С. 333–343.
 7. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
 8. *Новиков В.П.* Органические производные угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении // *Изв. АН Республики Таджикистан. Отд. наук о Земле*. 1993. № 4(7). С. 51–58.
 9. *Тимофеев П.П., Щербиков А.В., Ильин В.А.* Энергетика осадочного процесса. М.: Наука, 1989. 204 с.
 10. *Трофимова И.Е., Шеховцов А.И.* Оценка термического режима почв котловин Прибайкалья и северного Забайкалья // *География и природные ресурсы*. 2011. № 4. С. 100–107.
 11. *Туговик Г.И.* Перспективы использования природногорелых пород Гусиноозерского месторождения в строительной индустрии // *Минерально-сырьевая база строительных материалов Бурятии*. Улан-Удэ: БО ВМО, 1978. С. 75–78.
 12. *Филенко Р.А.* Рожденные подземным пожаром // *Наука из первых рук*. 2014. № 3/4 (57/58). С. 208–213.
 13. *Филенко Р.А.* Современное минералообразование в фумарольной зоне подземных пожаров на Черновском бурогольном месторождении // *Минералогия техногенеза*. Миасс: ИМинУрО РАН, 2014. С. 232–238.
 14. *Шутко А.М.* СВЧ радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1985. 215 с.
 15. *Юргенсон Г.* Минеральное сырье Забайкалья: Учеб. пос. Ч. II. Неметаллическое сырье. Кн. 1. Топливо-энергетическое, горно-химическое и горно-техническое сырье. Чита: Поиск, 2009. 308 с.
 16. *Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2004. V. 42. № 9. P. 1836–1849.
 17. *Shao Zh., Wang D.M., Wang Y.M., Zhong X.X.* Theory and application of magnetic and self-potential methods in the detection of the Heshituoluogai coal fire, China // *Journal of Applied Geophysics*. 2014. V. 104. P. 64–74.
 18. *Sharkov E. A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Springer/PRAXIS. 2003. 612 p.

REFERENCES

1. Bordonskii, G.S., Gurulev, A.A., Orlov, A.O., Luk'yanov, P. Yu., Tsyrenzhapov, S.V. *Prizemnye mikrovolnovye radiometricheskie izmereniya ledyanogo pokrova*. Baikal [Surface microwave radiometric measurements of Lake Baikal ice cover]. *Sovrem ennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli i zkosmosa*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 91–99 (in Russian).
2. Bordonskii, G. S. *Teplovoe izluchenie ledyanogo pokrova presnykh vodoemov* [Thermal radiation of freshwater ice]. Novosibirsk, 1990, 104 p. (in Russian).
3. Bordonskii, G.S., Gurulev, A. A. *Osobennosti radioteplovogo izlucheniya ledyanykh pokrovov vodoemov s razlichnoi stepen'yu mineralizatsii* [Characteristics of thermal radiation of ice covers on water bodies with different mineralization]. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 2. pp. 210–215 (in Russian).
4. Bordonskii, G.S., Orlov, A. O. *Issledovanie segnetoelektricheskikh fazovykh perekhodov vody v nanoporistykh silikatakh pri sovmestnykh elektricheskikh shumovykh i kalorimetricheskikh izmerenyakh* [Study of ferroelectric phase transitions of water in nanoporous silicate with the joint electrical noise and calorimeters]. *Fizika tverdogo tela*, 2014, vol. 56, no. 8, pp. 1575–1582 (in Russian).
5. Gurulev, A.A., Krylov, S. D. *Ispol'zovanie radioteplovogo izlucheniya dlya kontrolya za zagryazneniem del' reki Selengi* [Use of radiothermal radiation for pollution control in Selenga River delta]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2004, no. 1, pp. 72–75 (in Russian).
6. Zhukov, B.S., Khale, V., Shlottskhauer, G., Ertel', D. *Pros-transtvenno-vremennoi analiz teplovykh anomalii kak predvestnikov zemletryaseni* [Spatial and temporal analysis of thermal anomalies as the precursors of earthquakes]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 7, no. 2, 2010, pp. 333–343 (in Russian).
7. Kutateladze, S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the heat transfer theory]. Moscow, Atomizdat, 1979, 416 p. (in Russian).
8. Novikov, V.P. *Organicheskie proizvodnye ugol'nogo pozhara na Fan-Yagnobskom mestorozhdenii* [Organic derivatives of coal fire at Fan Yagnob field]. *Izvestiya AN Respubliki Tadzhikistan. Otdelenie nauk o Zemle*. 1993, no. 4(7), pp. 51–58 (in Russian).
9. Timofeev, P.P., Shcherbakov, A. V., Il'in, V. A. *Energetika osadochnogo protsessa* [Energy of sedimentary process]. Moscow, Nauka, 1989, 204 p. (in Russian).
10. Trofimova, I.E., Shekhovtsov, A.I. *Otsenka termicheskogo rezhima pochv kotlovin Pribaikal'ya i severnogo Zabaikal'ya* [Evaluation of the thermal regime of basin soils in CisBaikal and northern TransBaikal regions].

- Geografiya i prirodny resursy*, 2011, no. 4, pp. 100–107 (in Russian).
11. Tugovik, G.I. *Perspektivy ispol'zovaniya prirodno-relykh porod Gusinoozerskogo mestorozhdeniya v stroitel'noi industrii* [Prospects in the use of naturally burnt Gusinoozerskoe rock deposits in the construction industry]. *Mineral'no-syr'evaya baza stroitel'nykh materialov Buryatii* [Mineral and raw-material base of construction materials in Buryatia]. Ulan-Ude, BO VMO, 1978, pp. 75–78 (in Russian).
 12. Filenko, R. A. *Rozhdennyye podzemnym pozharom* [Born by an underground fire]. *Nauka iz pervykh ruk*, nos. 3/4 (57/58), 2014, pp. 208–213 (in Russian).
 13. Filenko, R.A. *Sovremennoe mineraloobrazovanie v fumarol'noi zone podzemnykh pozharovna Chernovskom burougol'nom mestorozhdenii* [Modern fumarole mineralization in the area of underground fires in Chernovskoye-brown coal deposit]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, Miass, MinUrO RAN, 2014, pp. 232–238 (in Russian).
 14. Shutko, A.M. *SVCh radiometriya vodnoi poverkhnostii pochvogruntov* [Microwave radiometry of water surface and soils]. Moscow, Nauka, 1985, 215 p. (in Russian).
 15. Yurgenson, G.A. *Mineral'noe syr'e Zabaikal'ya: Uchebnoe posobie. Chast' II. Nemetallicheskoe syr'e. Kniga 1. Toplivno-energeticheskoe, gorno-khimicheskoe igorno-tekhnicheskoe syr'e* [Minerals of TransBaikal region: Textbook. Part II. Non-metallic materials. Book 1. The fuel and energy, mining and chemical, mining and industrial raw materials]. Chita, Poisk, 2009, 308 p. (in Russian).
 16. Meissner, T., Wentz, F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water—from microwave satellite observations. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2004, vol. 42, no. 9, pp. 1836–1849.
 17. Shao, Zh., Wang, D. M., Wang, Y. M., Zhong, X.X. Theory and application of magnetic and self-potential methods in the detection of the Heshituo-luogai coal fire, China. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 104, pp. 64–74.
 18. Sharkov, E. A. *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*. Springer/PRAXIS. 2003. 612 p.

DETERMINATION OF SUBSURFACE COALFIELD FIRE USING THERMAL MICROWAVE RADIOMETRIC METHODS

A. A. Gurulev, R. A. Filenko, S. V. Tsyrenzhapov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Division,
Russian Academy of Sciences, ul. Nedorezova 16a, Chita, 672014 Russia. E-mail: lgc255@mail.ru*

In winter, in the regions with ground freezing reaching a few meters, their own thermal microwave radiation is formed at a great depth, enabling us to detect thermal anomalies caused by subsurface coal burning. In this paper, we propose a method of remote detection of subsurface coal fires, which relies on the registration of the thermal radiation using the radiometric receivers in the microwaves. The paper provides a theoretical basis for the identification of underground fires. For instance, according to thermal calculations, a point source located at a depth of 2 m with the evolution of heat 9 J/s at slow combustion of lignite creates 1°C temperature increment up at the ground surface. As the result of theoretical and experimental research in the field located in the Trans-Baikal region, the possibility of determining the burning of small amounts of coal at depths of a few meters is proved. In some cases, under intense fire or hot gas emission through fissures in the rock, fire can be detected at depths of 100 m or more. Furthermore, we have shown that the optimal length of the electromagnetic waves for registering underground fires lie in the decimeter diapason because the heat radiation in this range is formed from greater depths. At decimeter wavelengths, the determinable depth the underground fires approximately an order of magnitude higher than in the centimeter diapason,

Keywords: *microwave radiometry, underground coal fire.*