

Изучение проявлений подтоплений и предвестников самовозгораний на осушенных почвах активными и пассивными методами

Д.М. Бычков, В.К. Иванов, В.Н. Цымбал, С.Е. Яцевич

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: sey59@mail.ru

В статье анализируются результаты отработки метода диагностики проявлений переувлажнения покрытых травостоем, ранее осушенных, заболоченных почв, а также зон низкотемпературного окисления и самонагревания органических веществ, предшествующего их самовозгоранию, путем комбинированной суточной и сезонной радиолокационно-радиотепловой (термальной инфракрасной (ИК)) авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30. Отработка проводилась в условиях сухого осеннего сезона и зимой, когда вегетация в растительности в основном прекращена.

Ключевые слова: влажность, почва, низкотемпературное окисление и самонагревание торфа, дистанционное зондирование, ИК и СВЧ данные, обработка данных.

Введение

Значительная часть территории Украины покрыта заболоченными почвами. В настоящее время осушено 3273,6 тыс. га, или 49,8% болотно-мелиоративного фонда Украины (Болота Украины [сайт]. URL: <http://molodan.org.ua/boloto.html>). Еще 2500 тыс. га можно условно отнести к землям, прилегающим к осушенным массивам и подверженных влиянию сложных процессов осушительных мелиораций. Примерно каждый шестой гектар осушенных земель находится в неблагоприятном мелиоративном состоянии и около 70 тыс. га земель переосушены. Например, на Черниговском Полесье заболоченность достигает 5% и преобладают болота низменного типа. В их состав входят несколько болотных массивов, где издавна разрабатываются отложения торфа с мощностью пластов от 1,5 до 6 м. Система мелиоративного водоотвода, позволявшая раньше понижать уровень подповерхностных вод, и, соответственно, существенно уменьшать площадь переувлажненных земель и площадей, занятых болотами, в значительной степени запущена. Часть дренажных каналов загромождена, заросла камышом и не выполняет задач, возлагаемых на мелиоративную систему. Из-за нарушения расчетной сбалансированности системы водоотведения на некоторых участках развиваются такие опасные процессы, как переувлажнение ранее осушенных заболоченных почв, а на некоторых (переосушенных) – самовозгорание торфяников, которые оказывают существенное воздействие, как на сельскохозяйственную деятельность, так и на состояние экологии значительной части Украины. Необходимо развитие систем оперативного обнаружения таких процессов.

Экспериментальные исследования и обработка результатов, особенности подповерхностного горения торфа в заболоченных почвах

Как известно (Горная энциклопедия. Подземный пожар [сайт]. URL: <http://www.mining-enc.ru/s/samovozgoranie-torfa/>), в находящихся в заболоченных почвах слоях торфа весьма вероятно возникновение подземных пожаров. Торфяные пожары обычно возникают, когда уровень грунтовых вод понижается и торфяные пласти высыхают. Опасность торфяного пожара заключается в том, что горит торфяной слой глубоко под землей. Очаг тления может находиться на глубине от 0,3 до нескольких десятков метров. Торфяные пласти могут гореть без доступа воздуха с поверхности, что затрудняет тушение торфяных пожаров. Самовозгоранию торфа всегда предшествует более или менее длительный процесс низкотемпературного окисления и самонагревания, скорость которого определяется химической активностью торфа, условиями притока воздуха и возможностью отдачи тепла в окружающую среду. Склонность торфа к самовозгоранию зависит от его ботанического состава, степени разложения и физико-химических свойств. За первые 30–40 суток температура в слое торфа повышается на 3–5°C, в последующие 10–30 дней рост температуры ускоряется от 0,5 до 4,5°C в сутки и более. Самонагревание скоплений торфа при температурах до 60–65°C происходит преимущественно в результате жизнедеятельности микроорганизмов, а также окисления легко окисляющихся продуктов их жизнедеятельности и восстановленных веществ, которые накапливаются в анаэробных условиях. При температуре, превышающей 60°C, торф в течение нескольких дней превращается в полукохс, способный энергично взаимодействовать с кислородом воздуха. Поэтому дальнейшее повышение температуры торфа происходит преимущественно в результате его окисления кислородом и приводит к самовозгоранию торфа.

В связи с тем, что процессы низкотемпературного окисления и самонагревания происходят в основном в приповерхностных слоях в условиях избытка кислорода, положительные аномалии температурного поля в приповерхностных слоях и на земной поверхности могут достигать значений от единиц до нескольких десятков градусов. По данным (Шилин и др., 1971), очаги подземных пожаров на земной поверхности отслеживаются на глубинах до 15 м. Для дистанционного выявления подповерхностных тепловых аномалий используется тепловая ИК-съемка; так, например, по результатам съемки полигонов по захоронению бытовых отходов в (Контроль состояния торфяников, лесных массивов и полигонов по захоронению бытовых отходов [сайт]. URL: <http://www.aerogeо.ru/in-dex.php?option=com...view...>) делается вывод: «Тепловая ИК-съемка – единственный дистанционный метод, выявляющий очаги подземного самовозгорания на ранней стадии их зарождения».

Энергетический баланс открытой (не покрытой растительностью) поверхности Земли может быть представлен в виде (Чудновский, 1976):

$$(1-\alpha_{\text{shw}})L_{\Sigma\text{shw}} = L_{\text{efflw}} + L_{\text{conv}} + L_{\text{ev}} + L_{\text{soil}}, \quad (1)$$

где $L_{\Sigma\text{shw}}$ – поток суммарной коротковолновой радиации у земной поверхности; α_{shw} – коротковолновое альбедо; L_{efflw} – эффективное (с учетом противоизлучения атмосферы)

длинноволновое излучение земли; L_{conv} – конвективный поток тепла в воздухе; L_{ev} – поток тепла, расходуемый на испарение; L_{soil} – поток тепла в грунте.

Хорошо видно, что для открытой почвы вариации коротковолнового и длинноволнового альбедо ее поверхности, коэффициенты теплопоглощения, теплоемкости, теплопроводности и теплоизлучения (вызванные изменениями ее влажности, а также подповерхностными эндогенными процессами) непосредственно отображаются в интенсивности регистрируемого ИК излучения.

Для оценки температурных аномалий земной поверхности, возникающих вследствие процессов низкотемпературного окисления и самонагревания в приповерхностных слоях грунта органических веществ на глубинах 0–15 м, учитывая, что горизонтальные размеры зон окисления на два–три порядка превышают их мощность, в (Вульфсон, 2000) рассмотрена одномерная задача теплопроводности. При этом сделаны следующие допущения. Интенсивность тепловыделения B_0 , обусловленная жизнедеятельностью микроорганизмов, окисляющих органические вещества в центральной части месторождения, постоянна в интервале глубин z_1 – z_2 и отсутствует вне этой области. Влиянием вертикального конвективного переноса тепла можно пренебречь. Теплофизические характеристики грунта не зависят от глубины и постоянны во времени. Нижняя граница рассматриваемой области расположена глубже зоны распространения сезонных колебаний температуры грунта. Тепловой поток над зоной низкотемпературного окисления и самонагревания $-\lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=1} = q_r + q_{ga}$, где q_{ga} – составляющая, обусловленная генерацией и перераспределением теплового потока в зоне низкотемпературного окисления и самонагревания; q_r – региональный тепловой поток, не нарушенный процессами низкотемпературного окисления и самонагревания. Над фоном $-\lambda_b \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=1} = q_r$. При этом разность мгновенных радиационных температур поверхности над центром зоны низкотемпературного окисления и самонагревания и на фоне (с учетом того, что при проведении дистанционной ИК-съемки радиометр позволяет фиксировать радиационную температуру поверхности, связанную с ее термодинамической температурой, соотношением $T_{\text{rad}} = \sqrt[4]{\varepsilon} T_g$, где ε – коэффициент излучающей способности подстилающей поверхности) равна:

$$T_{\text{rad}}^a - T_{\text{rad}}^b = \sqrt[4]{\varepsilon^a} \left(T_e^a + \frac{q'_{ga} + q_r + q_m^a}{N^a} \right) - \sqrt[4]{\varepsilon^b} \left(T_e^b + \frac{q_r + q_m^b}{N^b} \right), \quad (2)$$

где $q_m = N(\Omega(t) - \Omega_t(t))$, $q'_{ga} = q_{ga} + B_0(z_2 - z_1)$, N – коэффициент теплообмена.

При эквивалентных условиях теплообмена и равенстве излучающих способностей подстилающей поверхности на фоне и над аномальной зоной разность $T_{\text{rad}}^a - T_{\text{rad}}^b$ будет представлять аномалию радиационной температуры, обусловленную составляющей теплового потока q'_{ga} , генетически связанной с аномальной зоной низкотемпературного окисления и самонагревания:

$$\Delta T_{\text{rad}} = T_{\text{rad}}^a - T_{\text{rad}}^b = \sqrt[4]{\varepsilon} \frac{q_{ga}}{N}. \quad (3)$$

Особенности проявления подповерхностных тепловых аномалий, вызванных процессами подтопления и низкотемпературного окисления и самонагревания в заболоченных почвах, покрытых растительностью

В случае же почвы, покрытой растительностью, все намного сложнее. В такой сложной системе как при инсоляции в дневное время, так и при ночной генерации длинноволнового ИК-излучения, происходят процессы многократного рассеяния и абсорбции. Это дает возможность дистанционного обнаружения и идентификации проявлений подповерхностных тепловых аномалий в почве в зависимости от соотношения реальных коэффициентов излучения и поглощения компонентов системы почва – растительный покров – атмосфера.

Воздействие комплекса влияющих факторов, включая падающее коротко- и длинноволновое излучение, воздушную температуру, влажность и ветер на соответствующей высоте, объединяются различными моделями, например, упрощенной моделью простой биосферы SSiB (Xue, 1991). Около 20 параметров растительности и почвы необходимы в этой модели для определения тепловлагообмена в почве, покрытой растительностью. В модели SSiB учитываются три слоя почвы, один слой растительного покрова и восемь прогностических переменных, включая влажность для трех слоев почвы (0,02, 0,48, и 1,1 м), водное содержание, сохраненное растительным покровом, снегом на земле, и температура покрова. Используются две температуры почвы: температура поверхности почвы и температура на глубине почвы. Модель учитывает устьичное сопротивление растительности (r_c), сопротивление почвы (r_{soil}), сопротивление граничного слоя растительного покрова (r_b), два аэродинамических сопротивления, управляющих обменом импульсами, тепла, и влаги между атмосферой и поверхностью земли. Очевидно, что такой набор необходимых параметров может быть определен только при контактных измерениях на ограниченных площадках. При дистанционном выявлении проявлений тепловых подповерхностных аномалий приходится использовать экспериментальные результаты.

В (Степи России. [сайт]. URL: <http://www.tdruv.ru/ecoteplo42.html>) рассмотрены результаты экспериментов по определению распределения температур «типа инсоляция» (днем) и «типа излучения» (ночью) для почвы, покрытой растительностью с преимущественно горизонтальной ориентацией листьев и преимущественно вертикальной, в зависимости от высоты растительности. Показано, что в режиме инсоляции слой растительности с преимущественно горизонтальной ориентацией листьев высотой более 30–40 см уже прогревается значительно сильнее почвы, допуская к ней все меньше солнечного излучения. Для растительности с преимущественно вертикальной ориентацией листьев подобный эффект начинает проявляться при высоте растительности более 100–120 см. Но максимумы температуры здесь не так велики, видимо, влияет и то, что в такие посевы может проникать ветер, перемешивая нижние слои воздуха.

В режиме же излучения картина совершенно другая – для растительности с преимущественно горизонтальной ориентацией листьев сохраняются более или менее характерные кривые распределения температуры по высоте «типа излучения», при этом почва

выхолаживается (т.е. отдает тепло) существенно меньше, чем открытая почва. Для растительности с преимущественно вертикальной ориентацией листьев излучение происходит и с поверхности почвы, и с поверхности травостоя, и из его глубины.

Эти результаты, принципиально не исключают возможность дистанционного наблюдения тепловых аномалий покрытой растительностью почвы. Необходимо также принять во внимание, что эти измерения проводились для развивающейся растительности в режиме вегетации, при котором на распределение температур в системе почва – растительность активно влияют потоки как явного, так и скрытого тепла.

Для определения опасных процессов в почве с учетом влияния растительного покрова, например, целесообразно комбинировать методы радиотеплового (т.е. термального ИК) пассивного и активного СВЧ радиолокационного дистанционного зондирования (Иванов, 2012).

Для определения интенсивности рассеяния радиолокационных сигналов поверхностью суши, покрытой растительностью, наиболее распространенной является модель покровного облака (Attema, Ulaby, 1978; Hoekman et al., 1982), разработанная как для однослоиного покрытия, так и для многослойных типов покрытий различных сельхозкультур. Модель отрабатывалась для диапазона радиолокационного зондирования 8–18 ГГц и 35 ГГц.

В рамках данной модели сигнал, отраженный от почвы, испытывает двукратное ослабление из-за прохождения сквозь слой растительности. Кроме того, слой растительности вносит свою компоненту в рассеянный сигнал из-за объемного рассеяния в нем. Компоненты рассеянного почвой и растительностью сигнала можно считать некогерентными и, если пренебречь вкладом за счет многократного переотражения в слое растительности, то суммарная УЭПР ($\sigma_{\text{покр}}^0$) покрова:

$$\sigma_{\text{покр}}^0(\theta) = \sigma_{\text{раст}}^0(\theta) + \sigma_{\text{поч}}^0(\theta)/L^2(\theta), \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{раст}}^0(\theta)$ – УЭПР растительности; $\sigma_{\text{поч}}^0(\theta)$ – УЭПР границы растительность-почва; $L(\theta)$ – коэффициент ослабления поля в слое растительности:

$$L(\theta) = 1/\gamma(\theta) = 1/\exp(-k_3 h \sec \theta), \quad (5)$$

где $\gamma(\theta)$ – коэффициент передачи энергии в слое; k_3 – погонное затухание в слое; h – высота растительного покрова; θ – угол падения.

На частотах свыше 8 ГГц при $\theta \geq 30^\circ$ удельный вклад растительности оказывается преобладающим, в то время как на более низких частотах и при $\theta = 10...30^\circ$ более заметным является вклад рассеяния почвой (Kulemin et al., 1989), интенсивность которого является функцией шероховатости и комплексной диэлектрической проницаемости почвы ϵ , которая связана с объемным влагосодержанием почвы эмпирической моделью Халликайнена (Hallikainen et al., 1985).

Экспериментальные результаты мониторинга проявлений подтоплений и предвестников самовозгораний на осущеных почвах

На рис. 1 a представлено радиотепловое (термальное ИК) изображение участка ранее осущеной заболоченной почвы (расположенного в Нежинском районе Черниговской области Украины, участок ограничен с севера селами Червоный Остер и Червоная Украина, двумя лесными массивами и с юга рекой Остер), полученное ИК-сканером Малахит-1 комплекса АКДЗ-30 в сухой осенний сезон (Иванов и др., 2012) в ночное время (около 23 часов). Густота сети дренажных каналов на этом участке свидетельствует, что ранее здесь располагалось болото низменного типа, которое было подвергнуто процедурам осушительной мелиорации. Это болото было отмечено еще на картах 1843 г. (Карты губерний, подведомственных Управлению Первого Департамента Государственных Имуществ с приложением кратких статистических ведомостей. 1843. [сайт]. URL: <http://wi-ki.laser.ru/index.php/Черниговская губерния>).

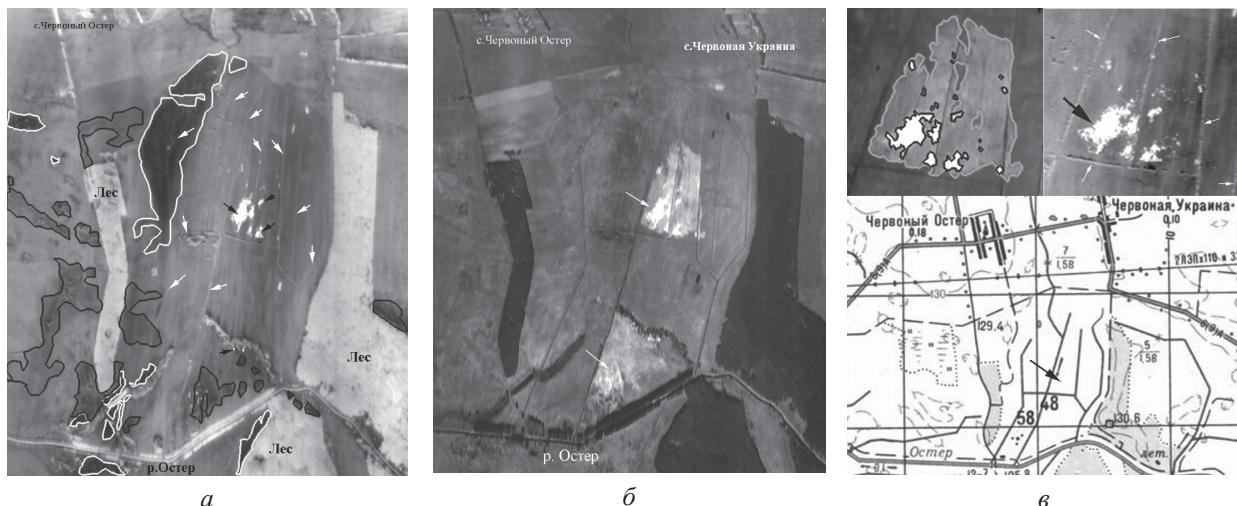


Рис. 1. Радиотепловое изображение участка заболоченной почвы, полученное ИК-сканером Малахит-1 комплекса АКДЗ-30 в сухой осенний сезон в ночное время (около 23 часов) (а); радиотепловое изображение этого же участка, полученное в дневное время (около 11 часов) (б); увеличенные радиотепловые изображения зон тепловыделения и повышенного ИК-излучения в дневное время (вверху слева), в ночное время (вверху справа) и карта исследуемого участка (внизу) (в)

Интенсивность ИК-излучения в этих зонах существенно превышает излучение всех остальных образований на изображении, что свидетельствует о том, что здесь развиваются процессы с выделением тепла.

На рис. 1 b представлено радиотепловое изображение этого же участка заболоченной почвы, полученное ИК-сканером Малахит-1 комплекса АКДЗ-30 в дневное время (около 11 часов) во время проведения суточного (последовательно днем и ночью) мониторинга, на котором также отчетливо наблюдаются зоны тепловыделения (отмечены стрелками белого цвета). Кроме того, на нем наблюдаются зоны ИК-излучения, повышенного относительно окружающего фона, которые отсутствуют на ночном изображении. На рис. 1 v

приведены увеличенные радиотепловые изображения зон тепловыделения и повышенного ИК-излучения в дневное время (вверху слева), в ночное время (вверху справа) и карта исследуемого участка (внизу). Дистанционно определяемые максимальные температурные контрасты относительно окружающего фона составляют: для зон тепловыделения $\approx 9^{\circ}\text{C}$ в ночное время и $\approx 7^{\circ}\text{C}$ в дневное, для зоны повышенного ИК-излучения в дневное время $\approx 1-2^{\circ}\text{C}$.

Зона тепловыделения не проявляется в виде вариаций растительного покрова ни на аэрофотоснимке (*рис. 2a*), ни на ИК-изображении, полученном в зимних условиях без снега (*рис. 2б*), ни на радиолокационном изображении, полученном РБО 8-мм диапазона комплекса АКДЗ-30 (*рис. 2в*) в сухой осенний сезон одновременно с *рис. 1б*.

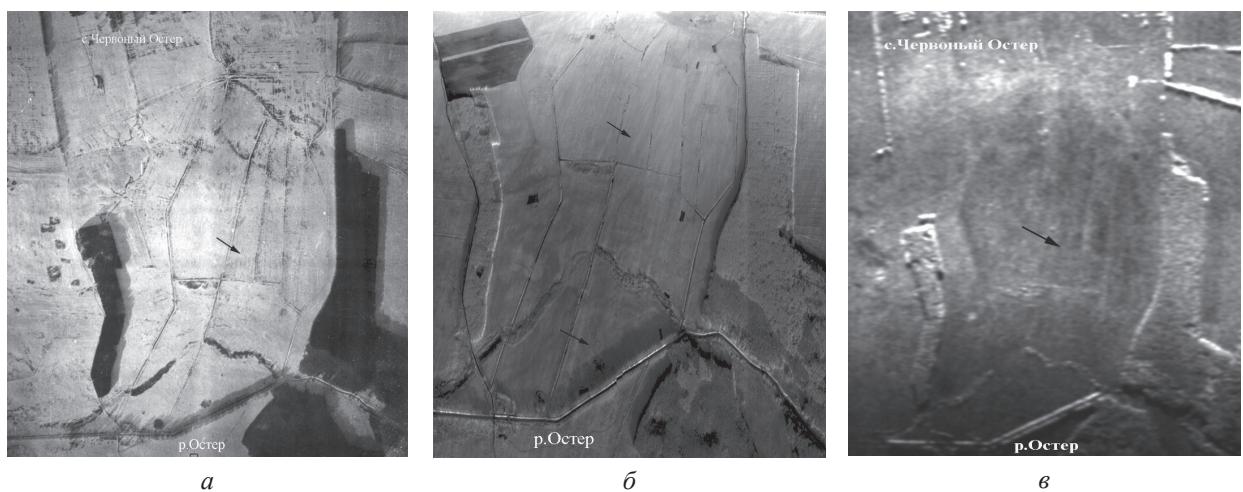


Рис. 2. Аэрофотоснимок участка заболоченной почвы, полученный в зимних условиях (а); ИК-изображение этого же участка, полученное зимой при отсутствии снежного покрова (б); радиолокационное изображение РБО 0,8, полученное одновременно с рис. 1б (в)

Типичный растительный покров для этой области представлен на фото *рис. 3* – это высокий травостой с редкими кустарниками и отдельными низкорослыми деревьями.



Рис. 3. Фотоснимок растительного покрова, типичного для участков заболоченной почвы в исследуемом районе

В данной области не существует подземных месторождений угля или других глубоко залегающих ископаемых, способных самовоспламеняться. Кроме того, визуально над зоной тепловыделения не наблюдалось задымленности, поэтому причиной тепло-выделения, вероятно, являются процессы низкотемпературного окисления и самонагревания в приповерхностных слоях органических веществ (скорей всего торфа), которые возникают в слоях (для этого района) глубиной не более 15 м и для которых характерны контрасты наблюдаемых поверхностных температур от единиц градусов до первых десятков градусов. Наблюдаемые же контрасты поверхностной температуры для горящих под землей торфяников, как правило, достигают 150°C (Fire resque. URL: http://firerescue.ru/magazine/pojar_po_priboram/), а горящих угольных пластов, в зависимости от глубины залегания, структуры покрывающих пород и их теплопроводности, изменяются от 20–30°C до 200–250°C (Zhang, 2004). Сопоставление полученных с интервалом около 12 часов дневного и ночного ИК-изображений показывает некоторое увеличение площади основной зоны тепловыделения, что свидетельствует о развитии процесса самонагревания. Последовательная (день за днем) ИК-съемка зон тепловыделения может позволить уточнить стадию и характер развития процесса самонагревания по динамике изменения поверхности температуры и площади аномальных зон (Горная энциклопедия. Подземный пожар [сайт]. URL: <http://www.mining-enc.ru/s/samovozgoranie-torfa/>).

Причиной возникновения зон повышенного относительно окружающего фона дневного ИК-излучения, очевидно, являются аномалии в альбедо поверхностного слоя сухого травостоя в осенний период, которое, как известно, в зависимости от состояния и полегания может изменяться в пределах 11–24% (Атмосфера. 1991 [сайт]. URL:<http://librar-um.org/book/1386/159>). Ни на ночном суточном ИК-изображении, ни на зимних аэрофотоснимке и ИК-изображениях, ни на РБО изображении не отмечаются какие-либо температурные аномалии или изменения растительного покрова, совпадающие с этими зонами. Так как все зоны тепловыделения располагаются внутри зон повышенного (на 1–2°C относительно окружающего фона) дневного ИК-излучения, то можно предположить, что отрицательные аномалии коротковолнового альбедо поверхностного слоя сухого травостоя в осенний период являются предвестниками процессов формирования в приповерхностном слое почвы условий, благоприятствующих развитию низкотемпературного окисления и самонагревания органических веществ (торфа, сена, соломы и т.п.), а в последующем их возгорания. Это предположение требует проведения дополнительных исследований.

Заключение

Результаты комбинированной суточной (в условиях сухого осеннего сезона, когда вегетация растительности в основном прекращена) и сезонной радиолокационно-радиотепловой (термальной ИК) авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30 покрытых травостоем осушительно мелиорированных почв показали, что радиолокационно-радиотепловая съемка позволяет выявлять и предупреждать ряд опасных процессов:

проявления переувлажненных (в результате нерабочего состояния дренажных каналов) участков, а также зон низкотемпературного окисления и самонагревания органических веществ (в том числе торфа), предшествующего их самовозгоранию на переосушенных участках.

Литература

1. *Вульфсон Л.Д.* Особенности формирования температуры и коэффициентов отражения земных покровов в тепловом ИК и СВЧ-диапазонах применительно к дистанционному зондированию в геологических и природоохраных целях: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. К., 2000. 236 с. Каталог диссертаций [сайт]. URL: http://www.ukrdisers.info/disser_45822.html.
2. *Иванов В.К., Матвеев А.Я., Цымбал В.Н., Яцевич С.Е.* Авиационная дистанционная радиолокационно-радиотепловая диагностика переувлажнения почв // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1. № 2. С. 91–106.
3. *Чудновский А.Ф.* Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 352 с.
4. *Шилин Б.В., Гусев Н.А., Караженский Е.Я.* Об использовании инфракрасной аэросъемки при выявлении участков избыточного увлажнения и выходов подземных вод // Сов. Геология. 1971. № 1. С. 155–160.
5. *Attema E.P.W., Ulaby F.T.* Vegetation modeled as a water cloud // Radio Science. 1978. No. 13 (2). P. 357–364.
6. *Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.S., Elrayes M.A., Wu L.-K.* Microwave dielectric behavior of wet soil // IEEE Trans. Geosc. Remote Sens. 1985. Vol. 23. No. 1. P. 25–34.
7. *Hoekman D.H., Krul L., Attema E.P.W.* A multilayer model for radar backscattering from vegetation canopies, Digest, II Annual Int. G.S & R.S. Symposium, Munich. 1982. Vol. II. P. 4.1–4.7.
8. *Zhang J.* Spatial and Statistical Analysis of Thermal Satellite Imagery for Extraction of Coal Fire Related Anomalies. PhD thesis at the University of Vienna, Austria. 2004. URL: http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/diss_jz_04.pdf.
9. *Kulemin G.R., Shcherbinin I.V., Yatsevich S.E. et al.* Physical Principles of Microwave Remote Sensing of Terrains // Proc. of the 6th physics international school «Microwave physics and technique». Varna. World Scientific Publ. Co. Singapore. Utopia Press. 2–7 Oct. 1989. P. 16–33.
10. *Xue Y., Sellers P.J., Kinter J.L. III, Shukla J.A.* Simplified biosphere model for global climate studies // Journal of Climate. 1991. Vol. 4. P. 345–364.

Manifestations of underfloodings and harbingers of spontaneous ignitions on drained-out wetlands investigation by active and passive methods

D.M. Bychkov, V.K. Ivanov, V.N. Tsymbal, S.Ye. Yatsevich

Institute of Radophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkov
E-mail: sey59@mail.ru

The paper analyzes the results of diagnosing manifestation techniques of covered with the grass stand dried-out wetlands over-wetted areas and organic substances low-temperature oxidation and self-heating zones by consecutive day-time and night-time and seasonal radar – thermal IR aviation remote sensing complex ACRS-30 surveys. The investigations were held in winter and dry autumn season conditions, whether vegetation processes in crops mostly stopped.

Keywords: over-wetted soil, low-temperature oxidation and self-heating of organic substances, remote sensing, thermal IR and radar microwave data, data processing.