

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 519.688 + 535.64 + 622.807.2

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

Поиск взаимосвязи температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветowych моделей

Амосов П. В.^{1*}, Горячев А. А.¹, Малодушев К. А.²,

Макаров Д. В.¹, Маслобоев В. А.¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

² Мурманский Арктический государственный университет (филиал), г. Апатиты, Россия

*e-mail: p.amosov@ksc.ru

Реферат

Актуальность. Высыхание поверхности пляжа хвостохранилищ приводит к ее ветровой эрозии. В результате усиливается процесс пыления, что приводит к нарушению функционирования экосистем прилегающих территорий и оказывает негативное влияние на здоровье населения. Для упрощения технологии нанесения реагентов и минимизации процессов пыления представляется перспективным использование цифровых фотоснимков, получаемых в том числе с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Цель исследования. Определение количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов отходов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab.

Методология исследования. На стандартном оборудовании выполнен лабораторный эксперимент по определению температуры и влажности проб поверхностного слоя хвостохранилища. При естественном освещении и ультрафиолетовом свете сделаны цифровые снимки проб. На первом этапе изображения подвергли компьютерной обработке для получения значений компонент двухцветowych моделей – RGB (рассчитаны индексы покраснения и насыщения) и Lab (рассчитан показатель разницы цвета, использованы два эталона – черный и белый). На втором этапе в качестве «нулевого» приближения исследована простейшая (линейная) аналитическая зависимость температуры от влажности и наоборот.

Результаты и их анализ. Выполнено сравнение коэффициентов расчетных линейных зависимостей с соответствующими коэффициентами прямой обработки данных эксперимента. Показано, что при естественном освещении минимальные отклонения для зависимости температуры от влажности соответствуют индексу покраснения в RGB-методике и черному эталону в Lab-методике; минимальные отклонения для зависимости влажности от температуры соответствуют индексу насыщения в RGB-методике и черному эталону в Lab-методике. Продемонстрировано, что при УФ-свете минимальные отклонения для зависимости температуры от влажности соответствуют индексу насыщения в RGB-методике и черному эталону в Lab-методике; минимальные отклонения зависимости влажности от температуры соответствуют индексу покраснения в RGB-методике и белому эталону в Lab-методике.

Выводы и область применения. Указанные индексы и цвета эталонов могут быть рекомендованы при обработке подобных лабораторных экспериментов и натурных исследований непосредственно на объекте пыления.

Ключевые слова: отходы обогащения; хвостохранилище; температура; влажность; нарушение экосистемы; цифровой фотоснимок; цветовая модель RGB; модель Lab; пыление; поверхность пляжа; БПЛА.

Работа выполнена в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)» и поддержана грантом РФФИ 19-05-50065 Микромир «Комплексная оценка воздействия микрочастиц в выбросах горных и металлургических предприятий Мурманской области на экосистемы и состояние здоровья населения Арктики».

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) имеют широкий спектр применения в приложении к задачам горной промышленности [1–13]:

- планирование и отчетность горных работ;
- идентификация нарушений растительного покрова, в том числе связанных с геологическими аномалиями;
- оценка воздействия на окружающую среду горных работ, мониторинг процесса рекультивации;
- оценка устойчивости уклонов, детального и точного картографирования бортов карьеров, разведка отвалов;
- оценка геометрических параметров карьеров, хвостохранилищ, обследование подземных выработок и др.

Применительно к таким техногенным горнотехническим объектам как хвостохранилища использование БПЛА ограничено в основном либо осмотром, либо оценкой геометрических параметров. Вместе с тем, по мнению сотрудников Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра (ИППЭС КНЦ) РАН, просматривается ряд направлений, по которым область применения БПЛА к техногенным объектам пыления может быть существенно расширена. Примерами таких научно-практических задач являются:

- мониторинг температуры и влажности атмосферы, температуры поверхности хвостохранилища с последующим выходом (через обработку и анализ результатов измерений) на влагонасыщенность поверхностного слоя материала;
- уточнение экспериментальных параметров гидрофизических зависимостей в известных подходах Brooks and Corey и van Genuchten;
- исследование профилей температуры и скорости ветра, влажности поверхностного слоя, концентрации пылевого загрязнения в слое атмосферы до 30–50 м с последующим выходом на формализованное описание горизонтального или вертикального потока массы пыли;
- фиксация динамики площади пыления с поверхности хвостохранилища в период пыльных бурь для валидации моделей процессов пыления, с использованием онлайн интегрированной системы моделирования Enviro-Hirnam, и последующим применением системы моделирования в прогнозных оценках загрязнения окружающей среды в эпизодических явлениях пыления на хвостохранилищах.

Весьма актуальной и интересной представляется задача по применению БПЛА для мониторинга температуры поверхности пылящих хвостов с привязкой к влажности материала, что позволит выполнять прогноз «готовности» конкретной площади хвостохранилища к началу процесса пыления. Именно в приложении к указанной задаче в лабораторном масштабе (пока не натурном эксперименте) выполнены исследования, результаты которых описаны в статье.

Известен ряд публикаций, в которых почвоведы для диагностики почв и описания почвенных профилей как важное физическое свойство используют цвет [14–18]. При этом его количественную оценку получают с помощью спектрофотометров и фотоколориметров. Однако они довольно дороги и неудобны

для эксплуатации в полевых условиях и, следовательно, недоступны для многих людей в целом и для измерения цвета в частности [16]. Напомним, что система Манселла [17, 18] по-прежнему остается основной при описании цвета.

Недорогой альтернативой спектрофотометрам и фотоколориметрам является использование цифровых камер для получения изображений и определения цветов. Цифровые камеры имеют ряд преимуществ перед 35-миллиметровой фото-пленкой, поскольку они позволяют избежать несоответствий при ее проявке и ошибок, возникающих при сканировании [19], а также обеспечивают большую чувствительность, чем стандартная пленка [20]. Недорогие цифровые камеры могут иметь преимущества перед узкополосными изображениями для большинства приложений дистанционного зондирования, так как они уменьшают потребность в точных калибровке и моделировании физических характеристик окружения (атмосфера, функция распределения двунаправленного отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function) и т. д. [20]).

Таблица 1. Экспериментальные значения температуры и расчетные значения влажности образцов

Table 1. Experimental temperature values and calculated humidity values of samples

№ образца	Влажность, усл. ед.	Температура, °С
1	0,3243	17,5
2	0,2958	17,3
3	0,2647	17,2
4	0,2308	17,5
5	0,1936	17,5
6	0,1525	19,7
7	0,1071	19,8
8	0,0826	19,7
9	0,0566	19,7
10	0	19,8

Цифровые камеры на сегодняшний день широко используются не только на бытовом уровне, но и во многих инженерных приложениях. Например, в работе [16] авторы упоминают приложения для измерения цвета поверхностей пищевых продуктов [21], для выявления повреждений растений кукурузы [22], определения местоположения персонажей на изображениях сцен [23], автоматического мониторинга снежного покрова в Антарктиде [24], оценки гумусированности почв на основе обработки их цифровых фотоизображений [25, 26], простого анализа поровой структуры почв [27] и ряд других [28–32]. Отдельно отметим исследования сотрудников Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) КНЦ РАН, в которых с применением цифровых изображений изучена способность модифицированного титаносиликатной добавкой цементного камня к самоочищению под воздействием видимого и ультрафиолетового (УФ) света [33–35].

Таким образом, цифровые камеры предоставляют новую и простую возможность охарактеризовать образцы почвы. Как и в случае стандартных приложений дистанционного зондирования, следует проявлять осторожность при анализе снятых цифровыми камерами изображений, чтобы избежать несоответствий из-за источника света. Обычно используется настраиваемый источник искусственного

освещения [21, 22]. Для точной калибровки также должны быть известны кривые квантовой эффективности матрицы и спектры пропускания объектива [19]. Однако производители цифровых камер часто не предоставляют их, поскольку они считаются промышленной тайной.

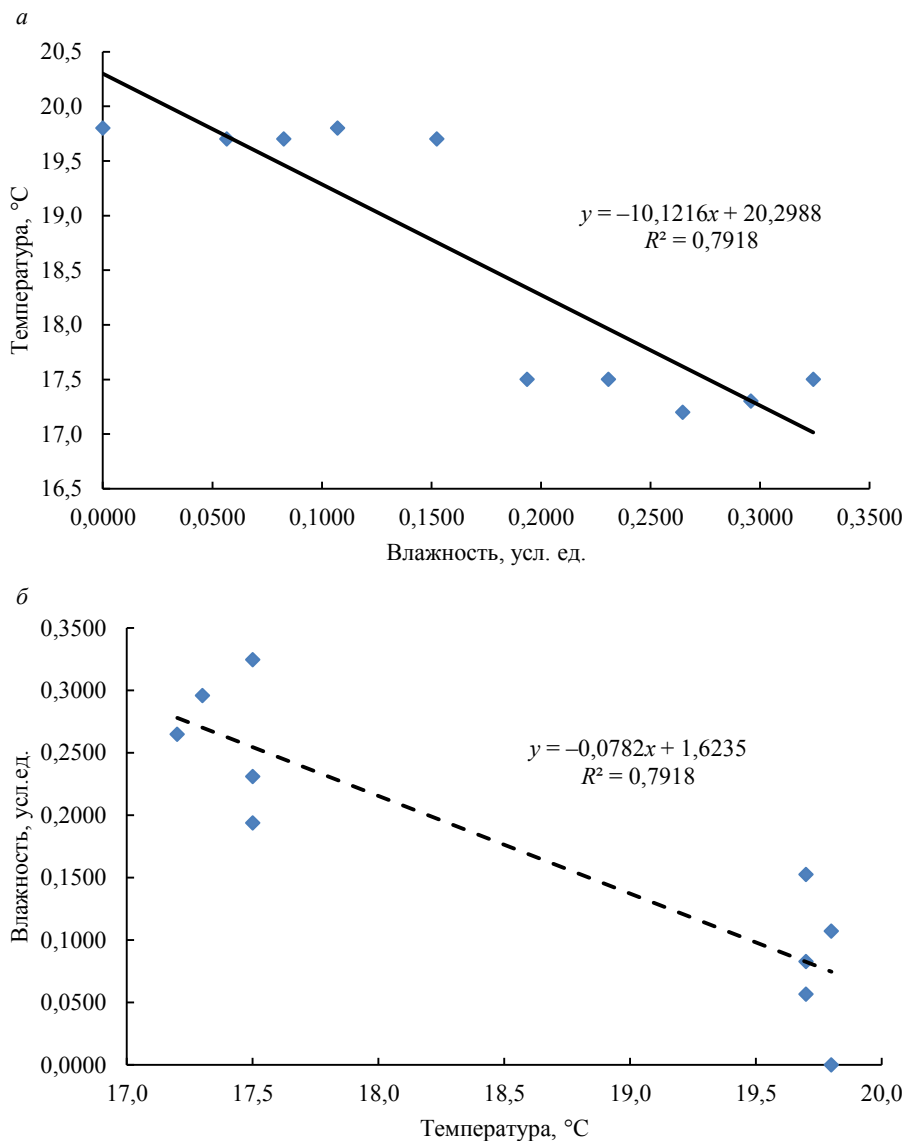


Рисунок 1. Графики (и тренды) экспериментальных зависимостей: *a* – температуры от влажности; *б* – влажности от температуры
Figure 1. Graphs (and trends) of experimental dependencies between: *a* – temperature and humidity; *б* – humidity and temperature

Во многих исследованиях стандартные цветные чипы [21], окрашенные деревянные панели [19, 20] или просто стандартный эталонный белый [36] отображались внутри сцены («калибровка в полете»), чтобы обеспечить калибровку значений RGB.

Используя цифровую камеру в лаборатории и при идеальных условиях освещения, авторы работ [37, 38] смогли предсказать содержание органического углерода в почве (SOC – soil organic carbon) для образцов, собранных в Бретани (Франция). Было отмечено, что лучшие корреляции наблюдались для увлажненных образцов. Кроме того, обнаружено, что измерения цвета с использованием значений интенсивности изображения RGB или цветовых координат Международной комиссии по освещению (CIE – commission international de l'éclairage) Lab показывают хорошую реакцию на SOC (при более высоком содержании SOC, затемняющего почву). Дополнительно авторы обнаружили, что предсказания содержания SOC с использованием простых цветовых моделей с цифровой камеры сопоставимы с полученными с помощью данных спектрального отражения или даже лучше них.



Рисунок 2. Результаты фотосъемки при естественном свете и комнатной температуре
Figure 2. The results of photo survey in natural light and at room temperature

Российские почвоведы [17] отмечают, что цвет почвы является главным морфологическим и диагностическим признаком, который определяется ее химико-минералогическим составом и дает представление о составе почвы и ее физико-химических свойствах. Окраска почвы в видимом диапазоне (400–700 нм) связана с присутствием компонентов, способных поглощать или рассеивать излучение различной длины волны и интенсивности. Органическое вещество, оксиды железа, карбонаты, вода и химический состав глинистых минералов являются основными компонентами, влияющими на цвет почвы [16].

В лабораторных экспериментах при прочих равных условиях (содержание органического вещества, оксидов железа, карбонатов и химический состав глинистых минералов) именно наличие разного количества влаги в образцах будет оказывать влияние на цвет поверхности материала хвостохранилища.

Цель исследования заключается в определении количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов хвостов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab.

Описание методики лабораторного эксперимента. В лабораторном масштабе проведена серия опытов, направленная на определение цветовых различий

материала хвостов обогащения хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит» (г. Апатиты, Мурманская область) в зависимости от содержания в нем влаги. Для этого были отобраны пробы поверхностного слоя хвостохранилища с применением режущего кольца объемом 815,1 см³ на глубину 25 см от поверхности.

Для проведения лабораторных испытаний взяты 10 образцов массой 50 г. Хвосты высушивали в течение двух суток до воздушно-сухого состояния. Каждый образец орошали дистиллированной водой в следующем количестве: № 1 – 24 мл; № 2 – 21 мл; № 3 – 18 мл; № 4 – 15 мл; № 5 – 12 мл; № 6 – 9 мл; № 7 – 6 мл; № 8 – 4,5 мл; № 9 – 3 мл; № 10 – без орошения. После орошения образцы выдерживали в течение 12 ч. Затем измеряли температуру каждого образца и выполняли фотосъемку при естественном освещении и УФ-свете [33–35]. Понятно, что использование УФ-света возможно только в лабораторных экспериментах.

Таблица 2. Результаты эксперимента и обработки цифровых снимков по методике RGB
Table 2. The results of the experiment and digital images processing using the RGB technique

№ образца	Естественный свет				УФ-свет			
	Пиксели	R	G	B	Пиксели	R	G	B
1	17690	67,4	53,2	36,7	17673	12,5	50,1	41,1
2	18216	64,1	52,1	38,0	17316	12,8	50,4	43,0
3	19440	66,6	53,7	37,6	18432	13,0	54,5	43,2
4	18078	61,6	49,3	33,8	17810	12,9	52,8	40,5
5	18688	68,9	55,5	39,5	17835	18,7	70,7	55,4
6	16728	89,2	71,8	49,7	18034	23,8	87,5	66,8
7	17667	110,2	90,7	65,2	17388	34,5	118,2	97,3
8	18029	114,7	98,1	73,5	18354	30,3	105,5	89,3
9	17112	113,7	97,0	72,2	17955	25,7	91,0	79,9
10	18522	115,2	96,8	71,4	18090	31,4	106,8	96,9
Белый	20083	244,3	220,7	182,6	20066	81,7	246,8	216,9
Черный	19840	27,6	24,6	18,8	18696	14,5	55,2	58,9

Измерение температуры производили с применением универсального цифрового термометра TP-101 (ООО «Теплоприбор», г. Москва, Россия). Точность измерения составляет 0,1 °С. В табл. 1 представлены экспериментальные значения температуры и расчетные значения влажности образцов. Влажность хвостов обогащения определяли в соответствии с ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» (ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Изд-во стандартов, 2016. 23 с.).

Построение в «нулевом» приближении графиков (и трендов) данных физического эксперимента дает следующие зависимости температуры от влажности (рис. 1, а) и наоборот (рис. 1, б):

$$T = -10,122w + 20,299; \quad w = -0,078T + 1,624,$$

где T – температура, °С; w – влажность, усл. ед.

Фотографические изображения получены с помощью камеры беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Enterprise Dual (SZ DJI Technology Co., Ltd, Китай). Аппарат оснащен оптической и термальной камерами M2ED (FLIR Systems

Inc., США). Одновременно с фотосъемкой образцов фотографировались два эталона – черный и белый (рис. 2).

Весьма любопытно, какие аналогичные зависимости получатся по результатам обработки фотоснимков на базе методик RGB и Lab, принимая экспериментальные зависимости в качестве эталонных.

Описание методик обработки фотоснимков.

Методика RGB. В большом количестве интернет-ссылок и печатных изданий имеется описание цветových моделей RGB и Lab [39–43].

Таблица 3. Расчетные индексы
Table 3. Calculated indices

№ образца	BI	SI	HI	CI	RI
<i>Естественный свет</i>					
1	53,913	0,295	2,721	0,118	8,22E-04
2	52,495	0,256	2,702	0,103	7,65E-04
3	53,954	0,278	2,602	0,107	7,62E-04
4	49,556	0,291	2,587	0,111	9,37E-04
5	55,940	0,271	2,675	0,108	7,03E-04
6	72,069	0,284	2,575	0,108	4,33E-04
7	90,594	0,257	2,529	0,097	2,50E-04
8	96,923	0,219	2,350	0,078	1,90E-04
9	95,829	0,223	2,347	0,079	1,96E-04
10	96,158	0,235	2,449	0,087	2,05E-04
<i>УФ-свет</i>					
1	38,103	–0,534	–7,356	–0,601	3,02E-05
2	38,957	–0,541	–9,162	–0,595	2,98E-05
3	40,847	–0,537	–6,345	–0,615	2,42E-05
4	39,134	–0,517	–5,488	–0,607	2,79E-05
5	52,970	–0,495	–5,797	–0,582	1,79E-05
6	65,025	–0,475	–5,155	–0,572	1,27E-05
7	90,607	–0,476	–7,010	–0,548	7,41E-06
8	81,696	–0,493	–8,284	–0,554	8,76E-06
9	71,474	–0,513	–10,766	–0,56	1,10E-05
10	85,209	–0,511	–14,232	–0,546	8,35E-06

Отмечается, что система RGB (по первым буквам английских названий цветов: Red – красный, Green – зеленый, Blue – синий) является аддитивной цветовой системой. При восприятии цвета человеком именно они непосредственно воспринимаются глазом. Остальные цвета представляют собой смешение трех базовых цветов в разных соотношениях. Максимальные значения всех трех базовых составляющих соответствует белому цвету (255, 255, 255), минимальные – черному цвету (0, 0, 0). В обработке информации иногда используют нормировку цветových компонент по следующим соотношениям:

– интенсивность $I = (R + G + B)/3$;

– цветových компоненты $r = R/(R + G + B)$; $g = G/(R + G + B)$; $b = B/(R + G + B)$.

При этом для всех цветов сумма $r + g + b = 1$.

Для каждого образца на базе разработанной К. А. Малодушевым программы (см. Приложение) получены осредненные по поверхности образцов значения

цветовых компонент модели RGB. Количество пикселей, принятых в обработку, составляло не менее 16 тыс.

Результаты физического эксперимента и компьютерной обработки снимков под методику RGB приведены в табл. 2.

Таблица 4. Расчетные значения ΔE_{abi}
Table 4. Calculated values of ΔE_{abi}

№ образца	Естественный свет		УФ-свет	
	ΔE_{abWh_1}	ΔE_{abBl_1}	ΔE_{abWh_2}	ΔE_{abBl_2}
1	66,212	17,269	77,879	9,287
2	67,275	15,598	77,923	8,161
3	66,274	16,938	75,624	10,693
4	68,294	15,045	76,316	11,427
5	65,399	17,697	68,077	15,099
6	57,593	26,069	60,554	22,008
7	49,388	34,037	47,982	31,587
8	46,703	36,048	53,433	25,710
9	47,178	35,653	59,819	18,964
10	47,026	36,005	53,621	24,300

В ряде прикладных исследований рекомендуют рассчитывать и анализировать не сами значения RGB или интенсивности, а 5 индексов цвета материала [14–16]: индекс яркости BI; индекс насыщенности SI; индекс оттенка HI; индекс окраски CI; индекс покраснения RI:

$$BI = \sqrt{\{(R^2 + G^2 + B^2) / 3\}};$$

$$SI = (R - B) / (R + B);$$

$$HI = (2R - G - B) / (G - B);$$

$$CI = (R - G) / (R + G);$$

$$RI = R^2 / (BG^3).$$

Расчетные значения индексов исследуемых образцов представлены в табл. 3.

Методика Lab. Успешной попыткой создания аппаратно-независимой модели цвета, основанной на человеческом восприятии цвета, является модель Lab [43]. Любой цвет в Lab определяется яркостью (Lightness) и двумя хроматическими компонентами: параметром a, который изменяется в диапазоне от зеленого до красного через серый, и параметром b, изменяющимся в диапазоне от синего до желтого через серый. Яркость в модели Lab полностью отделена от цвета. Это делает модель удобной для регулирования контраста, резкости и других тоновых характеристик изображения. Модель Lab является трехканальной. Ее цветовой охват включает охваты всех других цветовых моделей и соответствует видимому цветовому охвату стандартного наблюдателя.

Как и для модели RGB, для каждого образца на базе разработанной К. А. Малодушевым программы (см. Приложение) получены осредненные по поверхности образцов значения цветовых компонент модели Lab.

Следуя работам [17, 18], в цветовой модели Lab разница цвета вычисляется как показатель ΔE_{abi} по формуле, которая рекомендована Международной комиссией по освещению [44]:

$$\Delta E_{abi} = \sqrt{(L_i - L_r)^2 + (a_i - a_r)^2 + (b_i - b_r)^2},$$

где L_r, a_r, b_r – референтные значения, полученные с помощью спектрофотометра для стандартного источника освещения; L_i, a_i, b_i – значения, полученные с помощью цифрового устройства для i -го образца.

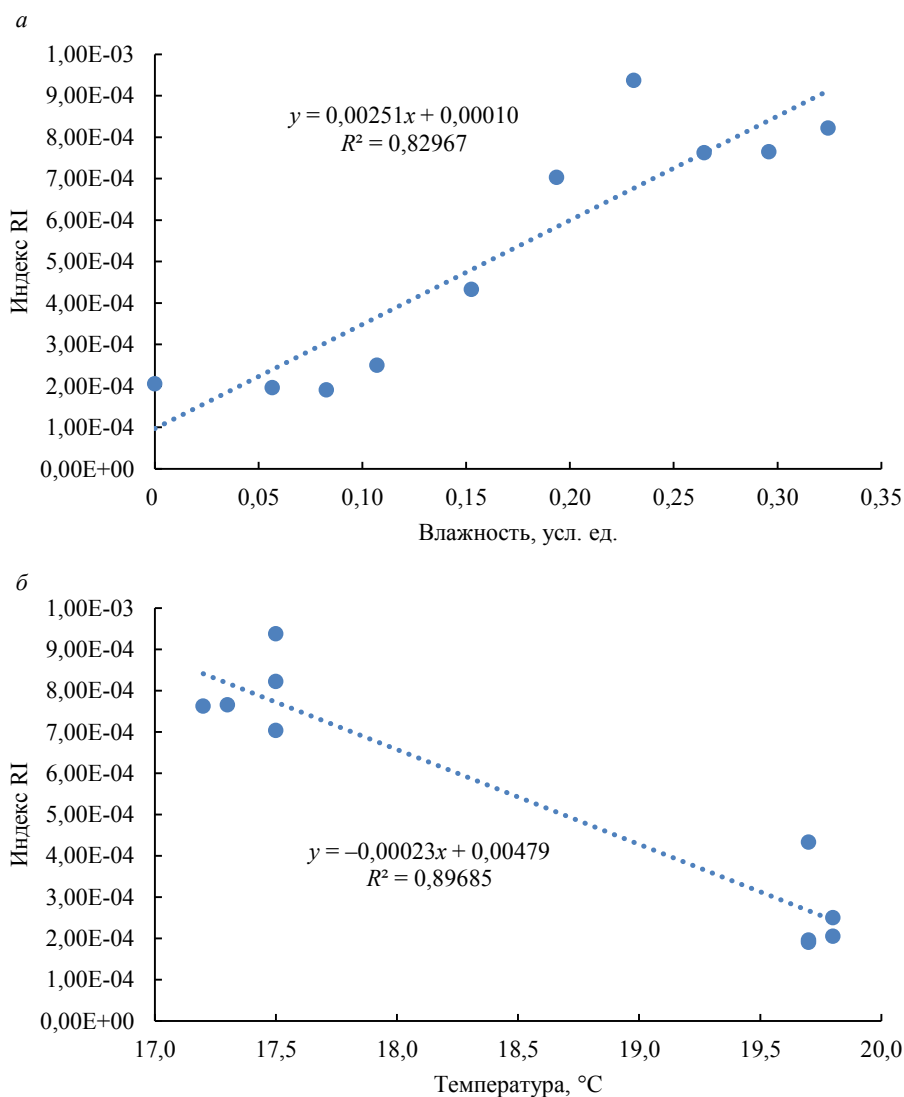


Рисунок 3. Графики (и тренды) индекса RI при естественном свете в зависимости от: а – влажности; б – температуры

Figure 3. Graphs (and trends) of the RI index in natural light depending on: а – humidity; б – temperature

В выполненном исследовании в качестве эталонных образцов использованы: **белый** (dEWh_1 – естественный свет и dEWh_2 – УФ-свет) и **черный** (dEBI_1 – естественный свет и dEBI_2 – УФ-свет). Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Анализ результатов обработки.

Методика RGB. При естественном свете в «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров построены графики (и тренды) индексов (SI и RI) (на рис. 3 представлены графики только индекса RI) в зависимости от температуры и влажности.

Приравнивая аналитические зависимости индекса $RI(T)$ и $RI(w)$ через линейные функции аппроксимации от температуры и влажности имеем связь между этими физическими параметрами:

$$T = -10,913w + 20,391; \quad w = -0,092T + 1,869.$$

Аналогичная обработка через индекс SI дает следующие результаты:

$$T = -13,456w + 20,863; \quad w = -0,074T + 1,555.$$

При УФ-свете в «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров также построены графики (и тренды) индексов (SI и RI) (аналоги графиков на рис. 3) в зависимости от температуры и влажности.

Приравнивая аналитические зависимости индекса $RI(T)$ и $RI(w)$ через линейные функции аппроксимации от температуры и влажности имеем связь между этими физическими параметрами:

$$T = -11,501w + 20,534; \quad w = -0,087T + 1,786.$$

Аналогичная обработка через индекс SI дает следующие результаты:

$$T = -9,535w + 20,194; \quad w = -0,105T + 2,118.$$

Методика Lab. В «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров построены графики (и тренды) показателя ΔE_{abi} в зависимости от температуры и влажности (см. рис. 4 и 5 и введенные ранее обозначения).

Приравнивая соответствующие значения ΔE_{abi} через функции аппроксимации от температуры и влажности, имеем связь между этими физическими параметрами.

При естественном свете (эталон – белый):

$$T = -11,144w + 20,474; \quad w = -0,089T + 1,837.$$

При естественном свете (эталон – черный):

$$T = -11,049w + 20,457; \quad w = -0,091T + 1,852.$$

При УФ свете (эталон – белый):

$$T = -10,936w + 20,438; \quad w = -0,091T + 1,869.$$

При УФ свете (эталон – черный):

$$T = -10,444w + 20,354; \quad w = -0,096T + 1,949.$$

В табл. 5 и 6 представлены рассчитанные отклонения коэффициентов a и b расчетных линейных зависимостей $y = ax + b$ от соответствующих коэффициентов

экспериментальных функций. Табл. 5 соответствует применению естественного света, а табл. 6 – использованию УФ-света.

Для естественного света можно отметить следующее.

Зависимость температуры от влажности:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для черного эталона;
- абсолютно выбиваются результаты для индекса SI.

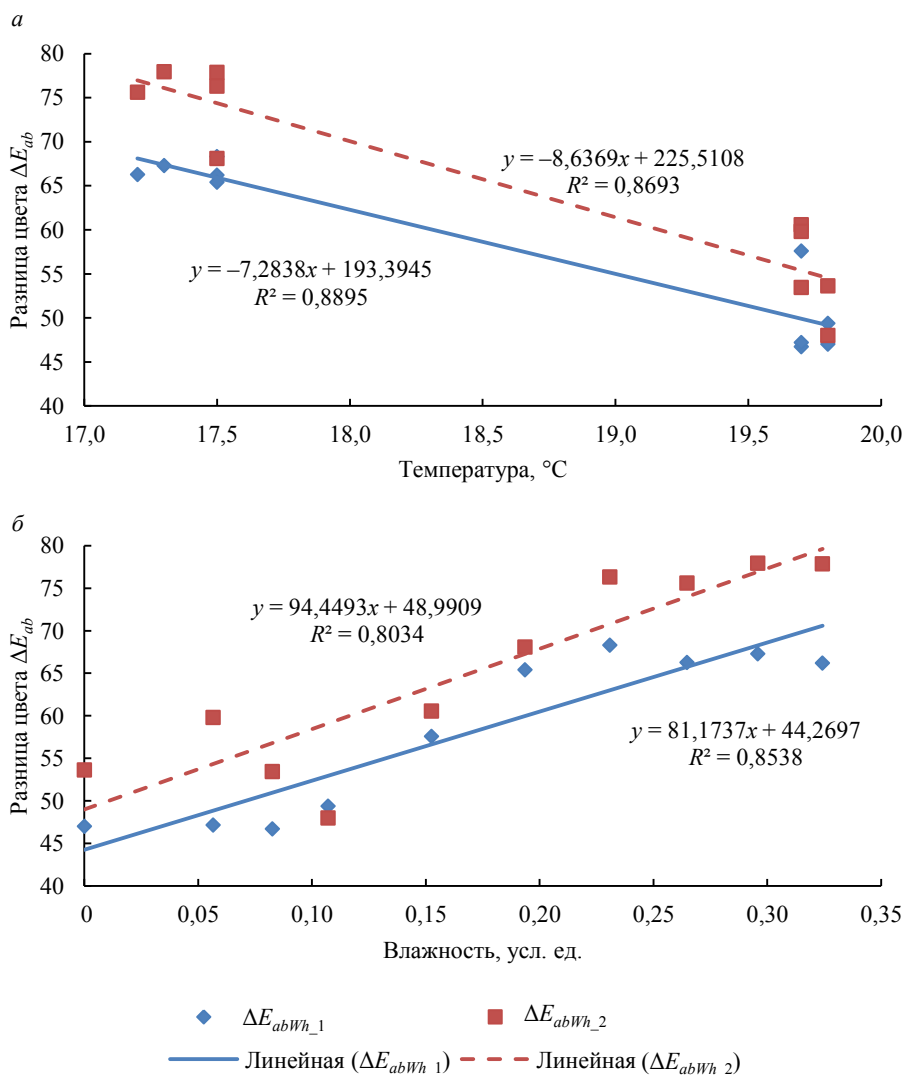


Рисунок 4. Расчетные значения показателя ΔE_{abi} в зависимости от температуры – а и влажности – б образцов при белом эталоне

Figure 4. Calculated values of the ΔE_{abi} indicator depending on the temperature – а and humidity – б of samples with a white standard

Зависимость влажности от температуры:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса SI;
- остальные результаты чрезвычайно неудачные.

Для УФ-света можно отметить следующее.

Зависимость температуры от влажности:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса SI и по Lab-методике для черного эталона;
- результаты по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для белого эталона менее удачны.

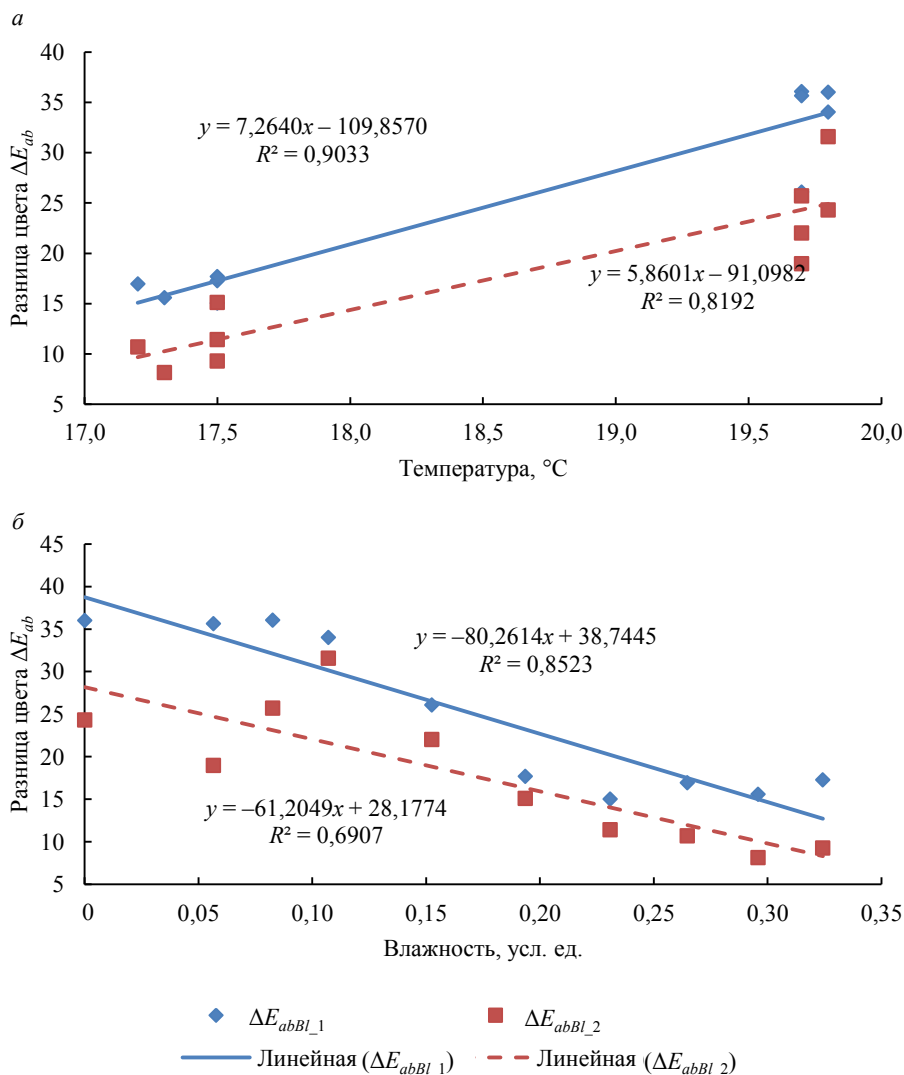


Рисунок 5. Расчетные значения показателя ΔE_{abi} в зависимости от температуры – а и влажности – б образцов при черном эталоне

Figure 5. Calculated values of the ΔE_{abi} indicator depending on the temperature – а and humidity – б of samples with a black standard

Зависимость влажности от температуры:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для белого эталона;
- результаты по RGB-методике для индекса SI и по Lab-методике для черного эталона также менее удачны.

Таким образом, в условиях естественного освещения (как наиболее реального) при анализе результатов аналогичных лабораторных и натурных экспериментов для описания зависимости температуры от влажности могут быть рекомендованы к использованию индекс RI и черный эталон в цветовых моделях RGB и Lab соответственно. В то же время для описания зависимости влажности от температуры можно использовать индекс SI в цветовой модели RGB. Кроме того, было бы весьма полезно повысить точность измерения температуры с целью более аккуратного математического описания результатов измерений.

Таблица 5. Отклонения коэффициентов a и b расчетных линейных зависимостей $y = ax + b$ от соответствующих коэффициентов экспериментальной функции при естественном свете

Table 5. Deviations of coefficients a and b of the calculated linear dependences $y = ax + b$ from the corresponding coefficients of the experimental function in natural light

Источник данных	Линейные зависимости	$\Delta a, \%$	$\Delta b, \%$
$T = aw + b$			
Эксперимент	$T = -10,122w + 20,299$	–	–
RGB (RI)	$T = -10,913w + 20,391$	0,791 (7,8)	0,092 (0,5)
RGB (SI)	$T = -13,456w + 20,863$	3,334 (32,9)	0,564 (2,8)
Lab (белый)	$T = -11,144w + 20,474$	1,022 (10,1)	0,175 (0,9)
Lab (черный)	$T = -11,049w + 20,457$	0,927 (9,2)	0,158 (0,8)
$w = aT + b$			
Эксперимент	$w = -0,078T + 1,624$	–	–
RGB (RI)	$w = -0,092T + 1,869$	0,014 (18,0)	0,245 (15,1)
RGB (SI)	$w = -0,074T + 1,555$	-0,004 (-5,1)	-0,069 (-4,3)
Lab (белый)	$w = -0,089T + 1,837$	0,011 (14,1)	0,213 (13,1)
Lab (черный)	$w = -0,091T + 1,852$	0,013 (16,7)	0,228 (14,0)

Представляется, что полученный результат дает определенные основания к проведению дальнейших исследований как в лабораторном масштабе с целью изучения динамики значений компонент цветовых моделей при изменении температуры поверхности пыления, так и непосредственно на объекте пыления с использованием БПЛА. В частности, в период пыления предстоит выполнить фотографирование поверхности хвостохранилища цифровой и инфракрасной камерами для измерения температуры различных участков поверхности и последующего анализа данных. В качестве эталонов для применения Lab-методики могут быть использованы самые светлые (сухие) и темные (влажные) участки объекта.

Выводы. В работе представлены результаты исследований по определению количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов хвостов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab. Используются пробы поверхностного слоя хвостохранилища АНОФ-2 (г. Апатиты, Мурманская область).

Рассмотрены два вида освещения: естественный и УФ-свет. В методике RGB проанализированы индексы насыщения и покраснения, в методике Lab использованы два эталона – белый и черный.

В качестве «нулевого» приближения исследована простейшая (линейная) аналитическая зависимость температуры от влажности и наоборот. Выполнено сравнение коэффициентов расчетных линейных зависимостей с соответствующими коэффициентами прямой обработки экспериментальных данных.

Показано, что при естественном освещении:

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости температуры от влажности соответствуют использованию индекса покраснения в RGB-методике и черного эталона в Lab-методике;

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости влажности от температуры соответствуют использованию индекса насыщения в RGB-методике.

Таблица 6. Отклонения коэффициентов a и b расчетных линейных зависимостей $y = ax + b$ от соответствующих коэффициентов экспериментальной функции при УФ-свете

Table 6. Deviations of coefficients a and b of the calculated linear dependences $y = ax + b$ from the corresponding coefficients of the experimental function in UV light

Источник данных	Линейные зависимости	Δa , %	Δb , %
$T = aw + b$			
Эксперимент	$T = -10,122w + 20,299$	–	–
RGB (RI)	$T = -11,501w + 20,534$	1,378 (13,6)	0,235 (1,2)
RGB (SI)	$T = -9,535w + 20,194$	-0,587 (-5,8)	-0,105 (-0,5)
Lab (белый)	$T = -10,936w + 20,438$	0,814 (8,0)	0,139 (0,7)
Lab (черный)	$T = -10,444w + 20,354$	0,322 (3,2)	0,055 (0,3)
$w = aT + b$			
Эксперимент	$w = -0,078T + 1,624$	–	–
RGB (RI)	$w = -0,087T + 1,786$	0,009 (11,5)	0,162 (10,0)
RGB (SI)	$w = -0,105T + 2,118$	0,027 (34,6)	0,494 (30,4)
Lab (белый)	$w = -0,091T + 1,869$	0,013 (16,7)	0,245 (15,1)
Lab (черный)	$w = -0,096T + 1,949$	0,018 (23,1)	0,325 (20,0)

Продемонстрировано, что при УФ-свете:

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости температуры от влажности соответствуют использованию индекса насыщения в RGB-методике и черного эталона в Lab-методике;

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости влажности от температуры соответствуют использованию индекса покраснения в RGB-методике и белого эталона в Lab-методике.

Указанные индексы и цвета эталонов могут быть рекомендованы при обработке подобных лабораторных и натуральных экспериментов.

Намечены пути дальнейших исследований в лабораторном и натурном масштабе. Использование цифровых изображений поверхности пляжа хвостохранилищ в перспективе может сделать процедуру принятия решений по нанесению реагентов более оперативной и эффективной.

Приложение

Описание программы для анализа фотоизображения

Назначение программы: считать количество пикселей фотоизображения и цвет этих пикселей, вывести необходимую информацию об изображении в формате цветковых моделей RGB и Lab после обработки данных.

Выходная информация: количество пикселей, значения цветковых компонент в форматах RGB, XYZ, Lab и другие параметры.

Загрузка и настройка изображения.

Загрузка изображения в Unity и настройка его для анализа. Для этого изменяем исходный тип изображения на Sprite (2D and UI), что позволяет Unity воспринимать изображение не просто как картинку, а как объект, с которым можно взаимодействовать.

Размещение изображения в рабочей зоне, которая является объектом типа Raw Image с соответствующим компонентом.

Код программы.

Программа написана по принципам объектно-ориентированного программирования (ООП). Программа логически разбита на части.

1. Анализ изображения и счет пикселей.

Используя метод GetPixels в классе Texture 2D, прочитываем цвет всех пикселей изображения и их количество. Получаем список цветов и находим его длину с помощью метода Length. Далее просматриваем все элементы списка и ищем цвет каждого пикселя, добавляя его в новый массив.

2. Центральное тело.

С использованием встроенного в Unity метода массив цветов переводим из формата Unity Color в HEX.

По формулам [45] переводим цвет в формате HEX в формат RGB и вычисляем среднее арифметическое по каждой компоненте.

3. Вспомогательные классы и методы.

Реализуем два класса: класс XYZ, который принимает цвет в формате RGB, и класс Lab, который принимает цвет в формате XYZ.

Класс XYZ: в классе созданы три поля x, y, z, которые хранят соответствующие компоненты. В классе присутствует конструктор, который принимает цвет в RGB и по формулам [46] преобразует компоненты в цвет в формате X, Y, Z и записывает их в поля объекта.

Класс Lab: в классе Lab имеется три поля L, a, b, которые хранят соответствующие компоненты. В классе присутствует конструктор, который принимает в себя цвет в формате XYZ и по формулам [47] преобразует компоненты в цвет в формате L, a, b и записывает их в поля объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Hu Zh. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives // International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. P. 320–333. URL: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5> (дата обращения: 30.03.2023).
2. Эдвардс Меган. Беспилотные летательные аппараты в горнодобывающей промышленности: пер. с англ. С. С. Верхозина. URL: <https://zolotodb.ru/article/11132> (дата обращения: 30.03.2023).
3. Преимущества аэрофотосъемки с помощью БПЛА Геоскан. URL: <https://www.geoscan.aero/ru/application/mining> (дата обращения: 30.03.2023).
4. Как дроны меняют горнодобывающую промышленность. URL: <https://4vision.ru/articles/kak-drony-menuayut-gornodobyvayushuyu-promyshlennost.html> (дата обращения: 30.03.2023).
5. Противовоздушный промышленный квадрокоптер Elios 2 создает трехмерные модели подземных горных выработок. URL: <https://www.pergam.ru/articles/mining-drone.htm> (дата обращения: 30.03.2023).
6. Крупин А. Дрон на производстве: как промышленность использует беспилотный транспорт. URL: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/204389/2020-02-03/2020-w06/dron-proizvodstve-kak-promyshlennost-ispolzuet-bespilotnyy-transport> (дата обращения: 30.03.2023).
7. Витковская С. Дроны в карьер. URL: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2019/12/06/817974-droni-karier> (дата обращения: 30.03.2023).
8. Асташина О. Горнодобывающая промышленность: преимущества применения дронов сегодня и перспективы на ближайшее время. URL: <https://dji-blog.ru/naznachenie/promyshlennye/gornodobyvajushhaja-promyshlennost-preimushhestva-primeneniya-dronov-segodnja-i-perspektivy-nablizhajshee-vremja.html> (дата обращения: 30.03.2023).
9. Картирование месторождений с помощью БПЛА. URL: <https://dprom.online/unsolution/kartirovanie-mestorozhdenij-s-pomoshhyu-bpla/> (дата обращения: 30.03.2023).
10. Бойко А. Области применения беспилотников. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/oblasti-primeneniya-bespilotnikov> (дата обращения: 30.03.2023).
11. Получение данных для горнодобывающей отрасли от этапа добычи до этапа отгрузки потребителю: тенденции цифровизации в горнодобывающей отрасли. URL: <https://www.consultdss.ru/digitalization-in-mining/> (дата обращения: 23.10.2021).

12. Репина И. А., Варенцов М. И., Чечин Д. Г., Артамонов А. Ю., Бодунков Н. Е., Калягин М. Ю., Живолютов Д. Н., Шевченко А. М., Варенцов А. И., Куксова Н. Е., Степаненко В. М., Шестакова А. А. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Иноватика и экспертиза*. 2020. Вып. 2(30). С. 20–39. URL: <https://www.inno-exp.ru/archive/30/20-39.pdf> (дата обращения: 30.03.2023).
13. Alvarado M., Gonzalez F., Erskine P., Cliff D., Heuff D. A Methodology to monitor airborne PM10 dust particles using a small unmanned aerial vehicle // *Sensors*. 2017. Vol. 17(2). 343. DOI: 10.3390/s17020343
14. Madeira J., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. Vol. 18. P. 2835–2852.
15. Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment // *Remote Sensing of Environment*. 1998. Vol. 66. P. 17–28.
16. Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. No. 24. P. 5475–5492.
17. Валева А. А., Александрова А. Б., Копосов Г. Ф. Цветовые характеристики лесных почв Волжско-камской лесостепи // *Ученые записки Казанского университета. Естественные науки*. 2015. Т. 157. Кн. 3. С. 58–66.
18. Кириллова Н. П., Силева Т. М. Анализ цвета почв с использованием цифровой камеры // *Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение*. 2017. № 1. С. 16–23.
19. Dean C., Warner T. A., Mcgraw J. B. Suitability of the DCS460c colour digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000. Vol. 55. P. 105–118.
20. King D. J. Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1995. Vol. 21. P. 245–273.
21. Yam K. L., Papadakis S. E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing colour of food samples // *Journal of Food Engineering*. 2004. Vol. 61. P. 137–142.
22. Sena D. G., Pinto F. A. C., Queiroz D. M., Viana P. A. Fall armyworm damaged maize plant identification using digital images // *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 85. P. 449–454.
23. Wang K., Kangas J. A. Character location in scene images from digital camera // *Pattern Recognition*. 2003. Vol. 36. P. 2287–2299.
24. Hinkler J., Pedersen S. B., Rasch M., Hansen B. U. Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23. P. 4669–4682.
25. Ачасов А. Б., Бидолах Д. И. Использование материалов космической и наземной цифровой фотосъемки для определения содержания гумуса в почвах // *Почвоведение*. 2008. № 3. С. 280–286.
26. Булыгин С. Ю., Бидолах Д. И., Лисецкий Ф. Н. Оценка гумусированности почв путем обработки их цифровых фотоизображений // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки*. 2011. Т. 16. № 15. С. 154–159.
27. Robertson E. A. G., Campbell D. J. Simple, low-cost image analysis of soil pore structure // *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997. Vol. 68. No 4. P. 291–296.
28. Пузаченко Ю. Г., Пузаченко М. Ю., Козлов Д. Н., Алещенко Г. М. Анализ строения почвенного профиля на основе цифровой цветной фотографии // *Почвоведение*. 2004. № 2. С. 133–146.
29. Adderley W. P., Simpson I. A., Davidson D. A. Colour description and quantification in mosaic images of soils thin sections // *Geoderma*. 2002. Vol. 108. No. 3–4. P. 181–195.
30. León K., Mery D., Pedreschi F., León J. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images // *Food Research International*. 2006. Vol. 39. No. 10. P. 1084–1091.
31. Melville M. D., Atchinson G. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space // *Journal of Soil Science*. 1985. Vol. 36. No. 4. P. 495–512.
32. Warner W. S. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photog-raphy // *Soil and Tillage Research*. 1995. Vol. 34. No. 3. P. 187–197.
33. Цырятьева А. В., Тюкавкина В. В. Оценка фотокаталитической активности титаносиликатных порошков синтетического происхождения // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2021. Т. 12. № 2(5). С. 273–278.
34. Tyukavkina V. V., Shchelokova E. A., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. TiO₂–SiO₂ nanocomposites from technological wastes for self-cleaning cement composition // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. P. 102648.
35. Shchelokova E. A., Tyukavkina V. V., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. Synthesis and characterization of SiO₂–TiO₂ nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 283. P. 122769.
36. Webster M. A., Mollon J. D. Adaptation and the color statistics of natural images // *Vision Research*. 1997. Vol. 37. No. 23. P. 3283–3298.

37. Viscarra Rossel R. A., Walter C. Towards a quantitative assessment of field soil organic carbon using proximally sensed digital imagery // In 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. No. 48. Paper no. 1523.

38. Viscarra Rossel R. A., Walter C., Fouad Y. Assessment of two reflectance techniques for the quantification of field soil organic carbon // Precision Agriculture. 2003. P. 697–703.

39. Селянкин В. В., Скороход С. В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения. Таганрог: ЮФУ, 2015. 82 с.

40. Постнов К. В. Компьютерная графика. М.: НИУ МГСУ, 2012. 289 с.

41. RGB. URL: <https://media.contented.ru/glossary/rgb/> (дата обращения: 30.03.2023).

42. Различия цветовых моделей RGB, CMYK, HSB. URL: <https://accent.su/blog/razlichiya-tsvetovyh-modelej-rgb-cmyk-hsb/> (дата обращения: 30.03.2023).

43. Аппаратно-независимые цветовые модели. URL: http://vtk34.narod.ru/putilina_rastrgraphic/lek/6/index.htm (дата обращения: 30.03.2023).

44. CIE 15: 2004. Technical report. Colorimetry. 3rd ed. Vienna: 2004. 72 p. DOI: <https://ia802802.us.archive.org/23/items/gov.law.cie.15.2004/cie.15.2004.pdf>

45. Конвертер RGB в HEX. URL: <https://wizlogo.com/ru/rgb-to-hex> (дата обращения: 30.03.2023)

46. Колориметрическая система хуз. URL: <https://unick-soft.ru/article.php?id=32> (дата обращения: 30.03.2023)

47. О цветовых пространствах. URL: <https://habr.com/ru/articles/181580/> (дата обращения: 30.03.2023).

Поступила в редакцию 21 октября 2022 года

Сведения об авторах:

Амосов Павел Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Горячев Андрей Александрович – младший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: a.goryachev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

Малодушев Кирилл Андреевич – студент Мурманского Арктического государственного университета (филиал в г. Апатиты). E-mail: kirillmalodushev@gmail.com

Макаров Дмитрий Викторович – доктор технических наук, директор Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: mdv_2008@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Маслобоев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, научный руководитель Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: v.masloboev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1536-921x>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

Searching for the relationship between the temperature and humidity of tailings material by processing digital photographs of laboratory experiments and color models

Pavel V. Amosov¹, Andrei A. Goriachev¹, Kirill A. Malodushev², Dmitrii V. Makarov¹, Vladimir A. Masloboev¹

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia.

² Murmansk Arctic State University (branch), Apatity, Russia.

Abstract

Relevance. Tailings beach surface dries and deflates, which intensifies the dusting process, results in ecosystems disruption on the adjacent territories, and adversely impacts health of population. The use of digital photographs, including those obtained with the help of unmanned aerial vehicles, seems to be promising in terms of reagents application simplification and dusting minimization.

Research objective is to determine the quantitative relationship between the temperature and humidity of tailings materials by analyzing the digital photographs of laboratory experiments using RGB and Lab methods.

Methods of research. Standard equipment was used to perform a laboratory experiment to determine the temperature and humidity of tailing dump surface layer samples. Digital photographs were taken in natural light and UV light. At the first stage, the images were processed to obtain the values of the components of two color models, RGB (redness and saturation indices were calculated)

and Lab (the color difference index was calculated, two standards of black and white were used). At the second stage, as a “zero” approximation, the simplest (linear) analytical dependence between temperature and humidity was studied.

Results and analysis. The coefficients of calculated linear dependences are compared with the corresponding coefficients of direct experimental data processing. It is shown that in natural light: the smallest deviations for the dependence of temperature on humidity correspond to the redness index in the RGB method and the black standard in the Lab method; the smallest deviations for the dependence of humidity on temperature correspond to the saturation index in the RGB method and the black standard in the Lab method. It is shown that in UV light: the smallest deviations for the dependence of temperature on humidity correspond to the saturation index in the RGB method and the black standard in the Lab method; the smallest deviations of the dependence of humidity on temperature correspond to the redness index in the RGB method and the white standard in the Lab method.

Conclusions and scope. The mentioned indices and colors of standards can be recommended when processing similar laboratory experiments and natural studies directly on the dusting site.

Keywords: tailings; tailing storage; temperature; humidity; ecosystem disruption; digital photograph; RGB color model; model Lab; dusting; beach surface; UAV.

The research was carried out within the R&D theme no. 1021051803680-5 “Transformation processes of natural and technogenic systems in the conditions of climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (by the example of the Murmansk region)” and supported by the RFBR grant 19-05-50065 Microworld “Integrated assessment of the impact made by microparticles in emissions from Murmansk mining enterprises and steelworks on ecosystems and Arctic population health status”.

REFERENCES

1. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Hu Zh. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019; 6: 320–333. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5> [Accessed 30 March 2023].
2. Edwards M. *Unmanned aerial vehicles in mining*. Transl. from English. (In Russ.) Available from: <https://zolotodb.ru/article/11132> [Accessed 30 March 2023].
3. *Advantages of aerial survey with UAV Geoscan*. (In Russ.) Available from: <https://www.geoscan.aero/ru/application/mining> [Accessed 30 March 2023].
4. *The way drones change the mining industry*. (In Russ.) Available from: <https://4vision.ru/articles/kak-drony-menyayut-gornodobyvayuschuyu-promyshlennost.html> [Accessed 30 March 2023].
5. *Shock-proof industrial quadrocopter drone Elios 2 creates 3D models of underground workings*. (In Russ.) Available from: <https://www.pergam.ru/articles/mining-drone.htm> [Accessed 30 March 2023].
6. Krupin A. *A drone at the production site: the way industry uses unmanned vehicles*. (In Russ.) Available from: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/204389/2020-02-03/2020-w06/dron-proizvodstve-kak-promyshlennost-ispolzuet-bespilotnyy-transport> [Accessed 30 March 2023].
7. Vitkovskaia S. *Drones in open pits*. (In Russ.) Available from: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2019/12/06/817974-droni-karer> [Accessed 30 March 2023].
8. Astashina O. *Mining industry: present-day advantages of drones and prospects for the nearest future*. (In Russ.) Available from: <https://dji-blog.ru/naznachenie/promyshlennye/gornodobyvajushhaja-promyshlennost-preimushhestva-primeneniya-dronov-segodnja-i-perspektivy-na-blizhajshee-vremja.html> [Accessed 30 March 2023].
9. *Mapping deposits with UAV*. (In Russ.) Available from: <https://dprom.online/unsolution/kartirovanie-mestorozhdenij-s-pomoshhyu-bpla/> [Accessed 30 March 2023].
10. Boiko A. *Uses of unmanned vehicles*. (In Russ.) Available from: <http://robotrends.ru/robotpedia/oblasti-primeneniya-bespilotnikov> [Accessed 30 March 2023].
11. *Obtaining data for mining industry starting with the stage of production and ending with dispatch to the consumer: digitalization trends in the mining industry*. (In Russ.) Available from: <https://www.consultdss.ru/digitalization-in-mining/> [Accessed 30 March 2023].
12. Repina I. A., Varentsov M. I., Chechin D. G., Artamonov A. Iu., Bodunkov N. E., Kaliagin M. Iu., Zhivoglotov D. N., Shevchenko A. M., Varentsov A. I., Kuksova N. E., Stepanenko V. M., Shestakova A. A. Application of unmanned aircraft for studying of the atmospheric boundary layer. *Innovatika i ekspertiza = Innovatics and Expert Examination*. 2020; 2(30): 20–39. (In Russ.) Available from: <https://www.inno-exp.ru/archive/30/20-39.pdf> [Accessed 30 March 2023].
13. Alvarado M., Gonzalez F., Erskine P., Cliff D., Heuff D. A Methodology to monitor airborne PM₁₀ dust particles using a small unmanned aerial vehicle. *Sensors*. 2017; 17(2): 343. Available from: doi: 10.3390/s17020343

14. Madeira J., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*. 1997; 18: 2835–2852.
15. Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment. *Remote Sensing of Environment*. 1998; 66: 17–28.
16. Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*. 2005; 26(24): 5475–5492.
17. Valeeva A. A., Aleksandrova A. B., Kopusov G. F. Colour characteristics of the forest soils in the Volga–Kama forest-steppe region. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Estestvennye nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2015; 157(3): 58–66. (In Russ.)
18. Kirillova N. P., Sileva T. M. Colometric analysis of soils using digital cameras. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie = Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2017; 1: 16–23. (In Russ.)
19. Dean C., Warner T. A., McGraw J. B. Suitability of the DCS460c colour digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000; 55: 105–118.
20. King D. J. Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1995; 21: 245–273.
21. Yam K. L., Papadakis S. E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing colour of food samples. *Journal of Food Engineering*. 2004; 61(1): 137–142.
22. Sena D. G., Pinto F. A. C., Queiroz D. M., Viana P. A. Fall armyworm damaged maize plant identification using digital images. *Biosystems Engineering*. 2003; 85: 449–454.
23. Wang K., Kangas J. A. Character location in scene images from digital camera. *Pattern Recognition*. 2003; 36: 2287–2299.
24. Hinkler J., Pedersen S. B., Rasch M., Hansen B. U. Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera. *International Journal of Remote Sensing*. 2002; 23: 4669–4682.
25. Achasov A. B., Bidolakh D. I. The use of space and ground digital photography for determining the humus content in soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2008; 3: 280–286. (In Russ.)
26. Bulygin S. Iu., Bidolakh D. I., Lisetskii F. N. Evaluation of soil humus content by treatment of their digital photographic images. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki = Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2011; 16(15): 154–159. (In Russ.)
27. Robertson E. A. G., Campbell D. J. Simple, low-cost image analysis of soil pore structure. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997; 68(4): 291–296.
28. Puzachenko Iu. G., Puzachenko M. Iu., Kozlov D. N., Aleshchenko G. M. Soil structure analysis with the use of digital color images. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2004; 2: 133–146. (In Russ.)
29. Adderley W. P., Simpson I. A., Davidson D. A. Colour description and quantification in mosaic images of soils thin sections. *Geoderma*. 2002; 108(3–4): 181–195.
30. León K., Mery D., Pedreschi F., León J. Color measurement in $L^*a^*b^*$ units from RGB digital images. *Food Research International*. 2006; 39(10): 1084–1091.
31. Melville M. D., Atchinson G. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *Journal of Soil Science*. 1985; 36(4): 495–512.
32. Warner W. S. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photog-raphy. *Soil and Tillage Research*. 1995; 34(3): 187–197.
33. Tsyriatieva A. V., Tiukavkina V. V. Evaluation of photocatalytic activity of titanosilicate powders of synthetic origin. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Kola Science Centre RAS*. 2021; 12; 2(5): 273–278. (In Russ.)
34. Tyukavkina V. V., Shchelokova E. A., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. TiO₂–SiO₂ nanocomposites from technological wastes for self-cleaning cement composition. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44: 102648.
35. Shchelokova E. A., Tyukavkina V. V., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. Synthesis and characterization of SiO₂–TiO₂ nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites. *Construction and Building Materials*. 2021; 283: 122769.
36. Webster M. A., Mollon J. D. Adaptation and the color statistics of natural images. *Vision Research*. 1997; 37(23): 3283–3298.
37. Viscarra Rossel R. A., Walter C. Towards a quantitative assessment of field soil organic carbon using proximally sensed digital imagery. In: *17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002*. No. 48. Paper no. 1523.
38. Viscarra Rossel R. A., Walter C., Fouad Y. Assessment of two reflectance techniques for the quantification of field soil organic carbon. *Precision Agriculture*. 2003; 697–703.
39. Seliainkin V. V., Skorokhod S. V. *Analysis and editing of images in the computer vision problems: training manual*. Taganrog: SFU Publishing; 2015. (In Russ.)

40. Postnov K. V. *Computer-generated imagery*. Moscow: NRU MUSE Publishing; 2012. (In Russ.)
41. *RGB*. (In Russ.) Available from: <https://media.contented.ru/glossary/rgb/> [Accessed 30 March 2023].
42. *Differences between the color models of RGB, CMYK, HSB*. (In Russ.) Available from: <https://accent.su/blog/razlichiya-tsvetovyh-modelej-rgb-cmyk-hsb/> [Accessed 30 March 2023].
43. *Device independent color models*. (In Russ.) Available from: http://vtk34.narod.ru/putilina_rastrgraphic/lek/6/index.htm [Accessed 30 March 2023].
44. *CIE 15: 2004. Technical report. Colorimetry. 3rd ed.* Vienna: 2004. 72 p. Available from: doi: <https://ia802802.us.archive.org/23/items/gov.law.cie.15.2004/cie.15.2004.pdf>
45. *RGB to HEX converter*. (In Russ.) Available from: <https://wizlogo.com/ru/rgb-to-hex> [Accessed 30 March 2023].
46. *Color measuring system xyz*. (In Russ.) Available from: <https://unick-soft.ru/article.php?id=32> [Accessed 30 March 2023].
47. *Regarding color spaces*. (In Russ.) Available from: <https://habr.com/ru/articles/181580/> [Accessed 30 March 2023].

Received 21 October 2022

Information about the authors:

Pavel V. Amosov – PhD (Engineering), leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Andrei A. Goriachev – junior researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: a.goriachev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

Kirill A. Malodushev – student, Murmansk Arctic State University (Apatity branch). E-mail: kirillmalodushev@gmail.com

Dmitrii V. Makarov – DSc (Engineering), Director, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: mdv_2008@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Vladimir A. Masloboev – DSc (Engineering), Head of research, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: v.masloboev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1536-921x>

Для цитирования: Амосов П. В., Горячев А. А., Малодушев К. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Поиск взаимосвязи температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветowych моделей // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 66–85. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

For citation: Amosov P. V., Goriachev A. A., Malodushev K. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Searching for the relationship between the temperature and humidity of tailings material by processing digital photographs of laboratory experiments and color models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 66–85 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85