

## Тема 3. Колір. Моделі кольору

### 3.1. Природа кольору

Колір – це один із факторів світлового випромінювання. Поняття кольору в КГ є основним. Світло можна розглядати двозначно: як потік частинок різної енергії (тоді колір світла визначає енергія частинок) або як потік електромагнітних хвиль високої частоти (у цьому випадку колір визначається довжиною хвилі). Ми розглядатимемо світло як потік електромагнітних хвиль, який після взаємодії з оточуючим середовищем попадає в око, де в результаті фізичної і хімічної реакції виробляються електроімпульси, що сприймаються мозком людини. За допомогою хвильової теорії, висунутої Гюйгенсом у 1678 р., було пояснено багато властивостей світла, зокрема закони відбиття та заломлення.

Однією із хвильових характеристик світла є довжина хвилі – відстань, яку проходить хвиля впродовж одного періоду коливання. Електромагнітна хвиля характеризується також амплітудою. Вона визначає енергію хвилі (енергія пропорційна квадрату амплітуди). *Видиме світло* – це множина хвиль довжиною  $\lambda$  від 380 – 430 нм (фіолетовий) до 605 – 780 нм (червоний). Нагадаємо, що  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ . Світло належить до досить вузького діапазону електромагнітних хвиль. Поза цим діапазоном знаходяться, наприклад ультракороткі, інфрачервоні, ультрафіолетові, рентгенівські хвилі.

Електромагнітні хвилі видимого діапазону задають такі кольори:

380 – 430 нм – фіолетовий;

430 – 470 нм – синій;

470 – 500 нм – блакитний;

500 – 560 нм – зелений;

560 – 590 нм – жовтий;

590 – 605 нм – оранжевий;

605 – 780 нм – червоний.

Сама по собі електромагнітна енергія не має ніякого кольору, відчуття кольору виникає в результаті фізичних та хімічних процесів в оці та мозку людини. Різна довжина хвилі сприймається нами як різний колір. Видиме світло з найбільшою довжиною хвилі буде червоним, із найменшою – синім. При зміні довжини хвилі кольори плавно переходять один в один. Чисті кольори існують лише при певних довжинах хвилі (наприклад, чистий фіолетовий – при довжині 400 нм). Слід зауважити, що колір має і психофізичну природу, тобто сприйняття кольору носить суб'єктивний характер і залежить не тільки від фізичних властивостей світла, а й від інтерпретації світла зоровою системою людини.

На практиці рідко трапляється світло певної довжини хвилі. Як правило, всі джерела світла генерують коливання в широкому діапазоні (винятком є лише випромінювання лазера), тому світло є неперервним потоком хвиль із різними довжинами та різними амплітудами. Таке світло можна характеризувати енергетичною спектральною кривою  $I(\lambda)$ , де значення  $I(\lambda)$  визначає вклад хвиль довжиною  $\lambda$  в енергію всього світлового потоку, що потрапляє на одиницю поверхні за одиницю часу (інтенсивність випромінювання). При цьому загальна енергія всього потоку світла за одиницю часу дорівнює інтегралу від спектральної функції по всьому видимому діапазону довжин хвиль

$$E = \int_E I(\lambda) d\lambda.$$

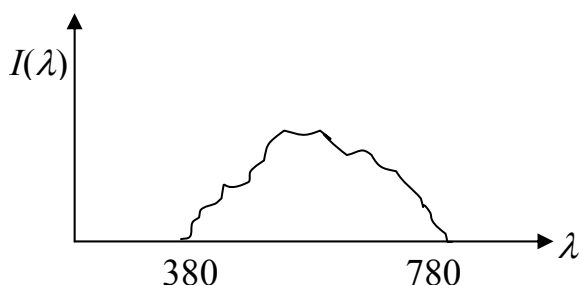


Рис. 3.1. Спектральна крива

Типова спектральна крива наведена на рис. 3.1. Отже, колір однозначно визначається спектральною функцією, але не навпаки.

Світло, що падає на поверхню об'єкта від певного джерела, частково поглинається об'єктом, частково відбивається від поверхні

об'єкта і частково проходить через об'єкт. Частки поглинання, відбивання та пропускання кожної складової світла залежать від довжини хвилі  $\lambda$  та від властивостей матеріалу, з якого зроблений об'єкт. Саме поняття кольору пов'язане з тим, як людське око сприймає світло. Деякі предмети ми бачимо тому, що вони відбивають світло, а деякі – тому, що вони випромінюють світло. В темній кімнаті прекрасно видно предмети, які випромінюють світло, і не видно, що написано на папері.

Коли предмети випромінюють світло (такими є монітори), вони мають той колір, який ми бачимо. Коли якісь предмети, наприклад папір, відбивають світло, їхній колір визначається кольором світла, що падає на предмет, і кольором, який ці предмети відбивають.

Розглянемо, як відбувається сприйняття світла людським оком. Людське око дуже складна система. Коли очі дивляться на світ – світло попадає в око через рогівку, далі за допомогою кришталіка проектується на сітківку ока, де фоторецептори перетворюють світлову інформацію в імпульси у нервових волокнах.

Сітківка ока містить два принципово різні типи світлочутливих рецепторів: *палички*, які володіють широкою спектральною кривою чутливості, внаслідок чого вони не розрізняють довжини хвиль, а отже, і кольору та *колбочки*, які характеризуються вузькими спектральними

кривими і тому володіють чутливістю до кольору. У кожному оці знаходиться біля 6 млн. колбочок і 120 млн. паличок (приблизно 250 млн. рецепторів на два ока).

В основі трикомпонентної теорії світла лежить той факт, що в

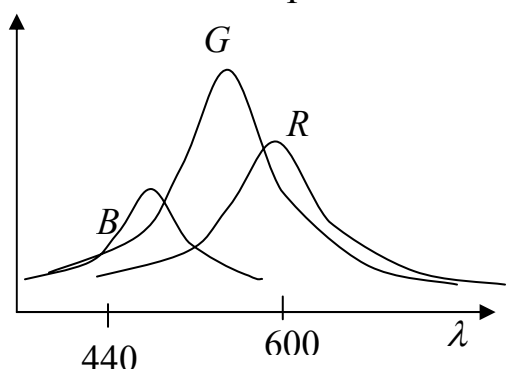


Рис. 3.2. Чутливість до кольорів

центральної частині сітківки знаходяться три типи чутливих до кольору колбочок, які відповідають за чутливість до довгих, середніх і коротких хвиль, тобто один тип колбочок реагує на зелений колір, другий – на червоний, а третій – на синій колір. Ці три кольори називаються основними (базовими). На рис. 3.2 наведено графіки функцій чутливості для всіх

трьох типів колбочок. В одних пік чутливості припадає на хвилі з короткою довжиною (448 нм – синій колір), у других – на хвилі середньої довжини хвилі (528 нм – жовто-зелений колір), у третіх – на хвилі з великою довжиною (667 нм – червоний колір). Видно, що найменша чутливість ока припадає на синій колір, а найбільша – на жовто-зелений.

Графік кривої, що відповідає за загальну чутливість ока до світла, формується в результаті додавання всіх кривих із рис. 3.2. Сумарна крива спектральної чутливості ока показана на рис. 3.3. Найбільша чутливість людського кольорового зору спостерігається для хвиль із довжиною 555 нм, що відповідають зеленому кольору. Тому з екрану ПК найкраще сприймаються жовто-зелені об'єкти. Крайні кольори важко сприймаються людським оком, яскраво-червоні та фіолетові кольори шкідливі для очей.

Якщо на всі три види колбочок діє однаковий рівень енергетичної яскравості, то світло буде білим. При низькому освітленні колбочки втрачають свою чутливість, зате зростає чутливість паличок, що забезпечує нашу здатність бачити при освітленні низького рівня, тому колбочки працюють вдень, а палички – вночі.

*Монохроматичним* називається випромінювання, спектр якого складається з єдиної лінії, що відповідає певній довжині хвилі.

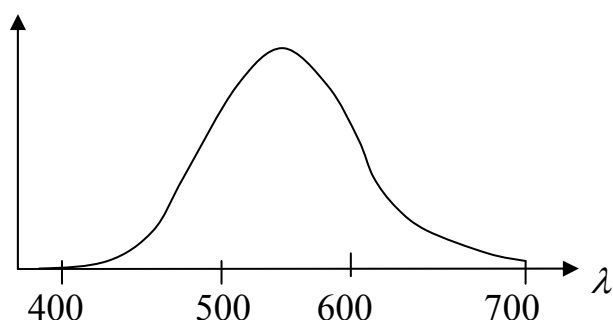


Рис. 3.3. Залежність чутливості людського зору від довжини хвилі світла

Досить якісним джерелом монохроматичного випромінювання є лазер. Колір монохроматичного випромінювання визначається довжиною хвилі.

Ньютон у 1666 р. показав, що білий колір можна подати як суміш всіх видимих монохромних кольорів, тобто рівномірним спектром суміші нескінченної кількості монохроматичних кольорів. Білий промінь світла (використовувався сонячний промінь)

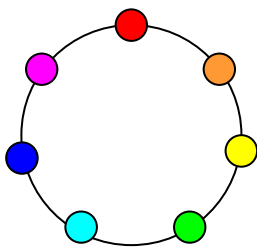


Рис. 1.4. Колірне коло Ньютона

спрямовували на скляну трикутну призму. Проходячи через призму, промінь заломлювався і на екрані давав кольорову смугу – спектр. Частинка видимого спектру має унікальне значення і називається *кольором*. У видимому спектрі наявні всі кольори, які плавно переходять один в один.

Видимий спектр складають мільйони кольорів. Ньютон розбив весь спектр на сім ділянок, які відповідали різним яскраво вираженим кольорам (червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій і фіолетовий). Інша частина дослідів Ньютона показала, що біле світло можна зібрати з кольорів веселки. Ньютон довів, що будь-який колір утворюється шляхом змішування основних кольорів, узятих у певній пропорції.

Наука, що вивчає колір і його вимірювання, називається *колориметрією*. Вона описує загальні закономірності сприйняття кольору людиною. Основними законами колориметрії є закони змішування кольорів. Ці закони в найбільш повному вигляді були сформульовані в 1853 р. німецьким математиком Германом Грассманом. Наведемо їх.

1. Закон тривимірності. Колір виражається в тривимірному просторі. Це означає, що для його опису потрібні три компоненти. Довільні чотири кольори знаходяться в лінійній залежності. Іншими словами, для будь-якого кольору  $C$  можна записати рівняння:

$$C = k_1 C_1 + k_2 C_2 + k_3 C_3,$$

де  $C_1, C_2, C_3$  – базисні, лінійно незалежні кольори,  $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти, що вказують на кількість змішуваних кольорів.

Перший закон можна трактувати і в більш широкому розумінні: необов'язково для опису кольору використовувати суміш кольорів, можна використовувати й інші величини, але їх обов'язково повинно бути три.

2. Закон неперервності. Якщо в суміші трьох кольорів один з них змінюється неперервно, а інші залишаються сталими, то колір суміші теж змінюється неперервно.
3. Закон адитивності. Колір суміші залежить тільки від кольорів ком-

понент і не залежить від їх спектральних складів, тобто змішувана компонента в свою чергу може бути отримана змішуванням інших компонент.

Для оцінки кольору людині зручно використовувати такі атрибути.

- **Тон (відтінок) кольору** асоціюється в людській свідомості з забарвленням предмета певним типом фарби. Тон кольору (відтінок) дозволяє людині відрізнити кольори (наприклад, зелений від червоного). Фізично тон кольору можна визначити переважаючою (усередненою) довжиною хвилі в спектрі випромінювання. Наприклад, світло, в якому переважає хвиля з довжиною 450 нм, буде сприйматися як відтінок синього кольору. Людське око спроможне розрізнити 350 тис. різних кольорів, хоча є й інші дані. Для характеристики відтінків вводять поняття яскравості і насиченості.
- **Яскравість (світлість)** визначається енергією, інтенсивністю випромінювання на одиницю площі і виражає кількість сприйнятого світла. Яскравість залежить від амплітуди електро-магнітних коливань. Білий колір має максимальну яскравість (100%), чорний колір дає повну відсутність яскравості (0%), тобто чим менша яскравість, тим темніший відтінок. Людське око може розрізнити близько тисячі різних рівнів яскравості.
- **Насиченість** характеризує рівень чистоти кольору і визначає кількість білого у відтінку того чи іншого кольору. Вона виражає співвідношення між основною домінуючою компонентою світла і рештою хвиль, що формують колір, тобто показує, наскільки даний колір відрізняється від білого. Чим вища насиченість, тим сильніше і ясніше відчувається тон кольору. Зниження насиченості приводить до того, що колір стає нейтральним без чітко вираженого тону. В ідеально чистому кольорі домішки білого відсутні (насиченість 100%). Якщо, наприклад, до чистого червоного кольору додати білий, то одержимо світлий блідо-червоний колір (низька насиченість). При насиченості, що дорівнює 0%, будь-який колір стає білим. Цей атрибут у людській свідомості пов'язаний із кількістю пігменту, фарби.

Вказані три атрибути дозволяють описати всі кольори. Те, що атрибути три, вказує на тривимірність кольору.

Необхідно ще уточнити, що ми розуміємо під тоном кольору. Аналіз спектру, зображеного на рис. 3.5, *a*, дозволяє стверджувати, що випромінювання має світло-зелений колір, оскільки чітко виділяється одна спектральна лінія на фоні рівномірного спектру білого кольору.

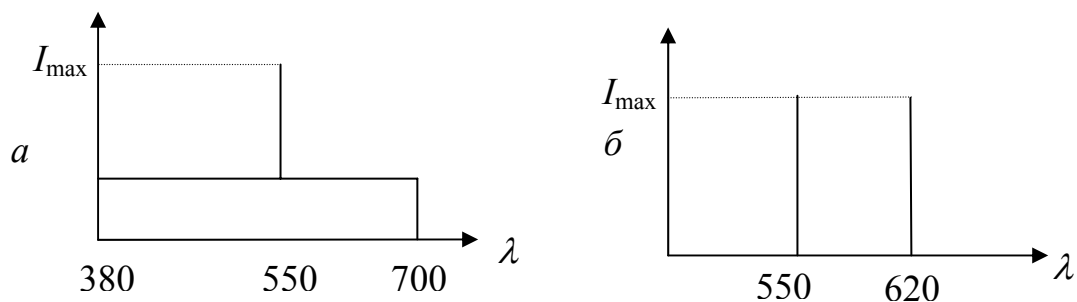


Рис. 3.5. Два спектри: *a* – явна перевага однієї складової, *б* – дві складові однакової інтенсивності

А який тон кольору відповідає спектру на рис. 3.5, *б*? Тут неможливо виділити в спектрі переважаючу складову, оскільки присутні червона та зелена лінії спектру мають однакову інтенсивність. За законами змішування кольорів це дає відтінок жовтого кольору, хоча в спектрі немає відповідної лінії монохроматичного жовтого. Тому під тоном кольору розуміють колір монохроматичного випромінювання, що відповідає сумарному кольору суміші (усередненій довжині хвилі).

### 3.2. Моделі кольорів

Колір може бути отриманий у процесі випромінювання та в процесі відбивання, тому існують два протилежних методи опису кольору: система адитивних кольорів і система субтрактивних кольорів. Для математичного опису кольору використовується поняття моделі кольору.

Кольори в природі рідко бувають простими. Більшість кольорових відтінків утворюється змішуванням основних кольорів. Спосіб розкладання кольору на складові компоненти називається *моделлю кольору*.

Існує багато різних моделей кольору, але в комп'ютерній графіці, як правило, застосовуються в основному три. Ці моделі відомі під назвою RGB, CMYK і HSB. Вони відрізняються базовими компонентами.

#### 3.2.1. Адитивна модель кольору RGB

Адитивна модель кольору найпростіша для розуміння. Вона є досить штучним прийомом, оскільки продиктована технологією виготовлення електронно-променевих трубок. Її використовують для опису кольорів, отриманих за допомогою пристроїв, робота яких базується на принципах випромінювання світла, тобто для пристроїв, що світяться (монітори, побутові телевізори). Це адитивна модель кольору, оскільки для отримання потрібного кольору базові кольори в ній додаються (змішуються). Основними кольорами вибрано червоний (Red), зелений (Green) і синій (Blue), бо сприйняття кольору людиною побудовано саме на цих кольорах. Інші кольори отримуються шляхом змішування певної кількості вказаних основних кольорів, тобто

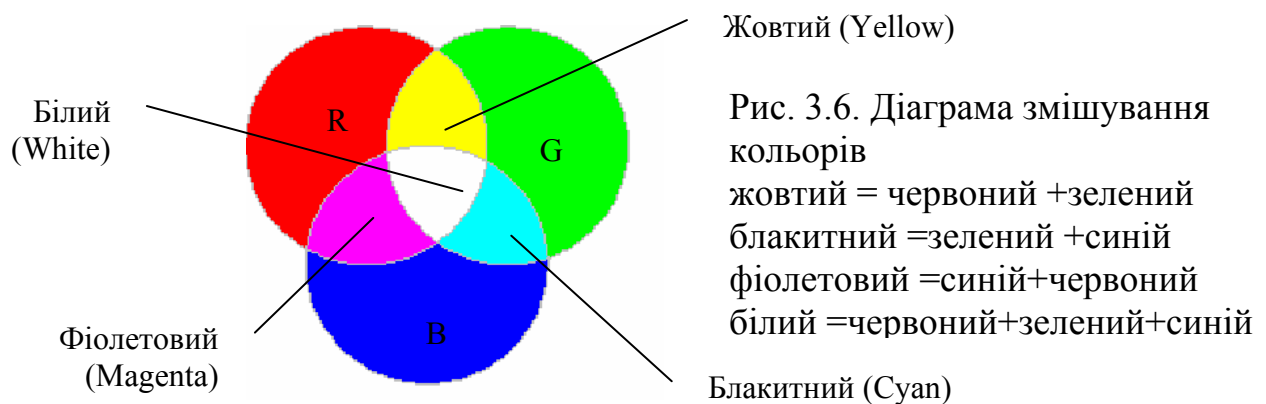
$$C = rR + gG + bB,$$

де  $r$ ,  $g$ ,  $b$  – відповідні кількості основних кольорів. Комп'ютер може точно управляти кількістю світла. Комбінуючи різні значення точок R, G, B, можемо одержати будь-який колір.

На сьогодні система RGB є офіційним стандартом. Рішенням Міжнародної Комісії з освітлення (МКО) в 1931 р. були стандартизовані основні кольори. Комісія рекомендувала використовувати як R, G, B такі монохроматичні кольори – випромінювання хвиль довжиною для R – 700 нм, для G – 546,1 нм, для B – 435,8 нм.

Червоний колір отримують за допомогою лампи розжарювання або криптонового лазера. Для одержання чистих зеленого і синього кольорів використовують ртутну лампу або аргонний лазер.

Діаграма змішування кольорів зображена на рис 3.6.



Колір, що створюється змішуванням трьох компонент, можна зобразити як вектор у тривимірній системі координат RGB. Точка (0, 0, 0) – центр системи координат, відповідає чорному кольору (відсутність свічення екрану). Білий колір виражається максимальним значенням всіх трьох компонент. Нехай це максимальне значення вздовж кожної осі дорівнює 255, що відповідає найбільшій яскравості світла. Тоді білий колір – це вектор (255; 255; 255).

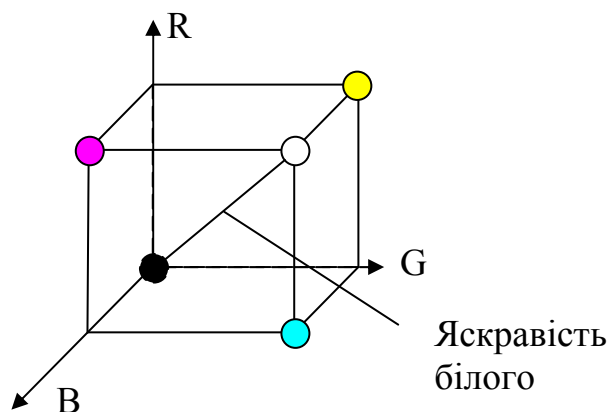


Рис. 3.7. Колірний куб у моделі RGB

Отже, наші очі й мозок, сприймаючи біле світло на екрані, говорять нам неправду, бо це комбінація червоних, зелених і синіх точок. Змішування кольорів R, G, B у різних пропорціях дає новий колір, тобто простором кольорів є колірний куб (рис. 3.7). Точки з рівними значеннями R, G, B ( $R = G = B$  означає однаковий

внесок трьох базових кольорів) лежать на головній діагоналі колірнього кубу і являють собою різні градації сірого кольору (їх можна вважати білим кольором різної яскравості).

Ця модель використовується завжди при підготовці екранного зображення. Якщо зображення проходить обробку в графічному редакторі, то його теж подають у цій моделі.

### 3.2.2. Субтрактивна модель кольорів СМУ/СМУК

Субтрактивна модель використовується для підготовки не екранних, а друкованих зображень, тобто для пристроїв, які реалізують принцип поглинання (віднімання) кольорів. Друковані зображення відрізняються від екранних зображень тим, що їх бачать не у світлі, що проходить, а у відбитому світлі, оскільки аркуш паперу не випромінює світло. Замалований папір деякі електромагнітні хвилі з оптичного діапазону поглинає, а решту відбиває, а наше око сприймає лише відбиті хвилі. Тому для підготовки друкованих зображень використовується не адитивна модель RGB, а субтрактивна модель СМУ. На відміну від моделі RGB, біла точка в СМУ – це відсутність фарб на папері.

Назва цієї моделі складається з назв субтрактивних кольорів (протилежних до R, G, B) – блакитного (Cyan), пурпурного (Magenta) і жовтого (Yellow) (рис. 3.8), тобто, щоб отримати потрібний колір, базові кольори віднімаються від білого. Ці три кольори називаються доповнювальними, оскільки вони доповнюють основні кольори до білого, тобто змішування даного кольору і доповнювального до нього дає білий колір. Ці співвідношення можна подати у вигляді

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix},$$

тобто *доповнювальний колір = білий колір – даний колір*.

Обернене перетворення здійснюється за формулою

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}.$$

Наприклад, коли на поверхню паперу нанести блакитний (cyan) колір, тоді червоне світло, що падає на папір, повністю поглинатиметься. Отже, блакитна фарба, так би мовити, віднімає червоний колір від білого, який є сумою червоного, зеленого і синього кольорів, тобто відбивається лише зелена та синя складові світла, що і дає блакитний колір (рис. 3.9).

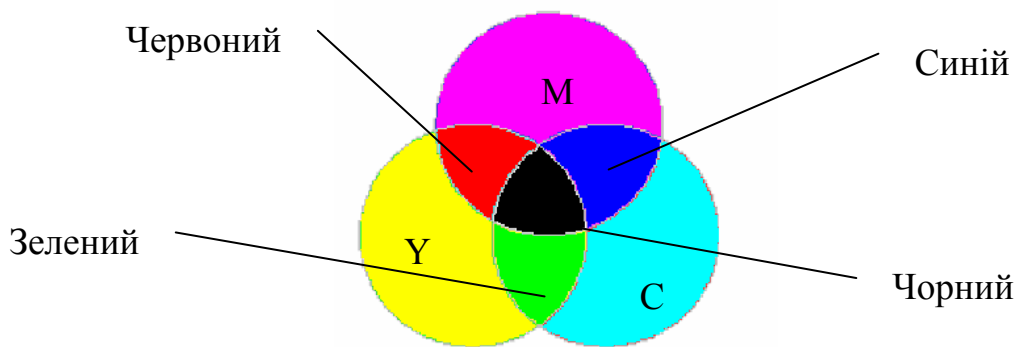


Рис. 3.8. Основні кольори системи СМУ

Аналогічно жовта фарба (Yellow) поглинає синій колір, а пурпурна (Magenta) – зелений. Білий папір виглядає білим тому, що він відбиває всі кольори і жоден не поглинає (рис. 3.9).

При освітленні білим світлом, наприклад, синьої поверхні в шарі синьої фарби зі спектру білого кольору поглинаються червона та зелена частини спектру і в результаті ми бачимо синій колір (рис. 3.10) Чорний колір відповідає поглинанню всіх кольорів при відображенні (рис. 3.10). Якщо освітити червоний папір синім або зеленим світлом, то папір буде виглядати чорним, оскільки червоний папір не відбиває синій та зелений кольори, а поглинає їх (рис. 3.9).

Істотною проблемою в поліграфії є чорний колір. Теоретично його можна отримати змішуванням трьох доповнювальних фарб, але на практиці змішування цих трьох кольорів дає невизначений темно-коричневий колір. Отримати на папері чорний колір шляхом змішування трьох фарб складно і незручно через те, що реальні фарби не є абсолютно чистими, через великі витрати дорогого чорнила та високу вологість паперу на струменевих принтерах, через небажані візуальні ефекти, тому в принтерах до базових фарб СМУ доводиться додавати ще й фарбу чорного кольору (black). Така модель кольору називається СМУК.

При друці малюнка на кольоровому принтері з чотирма кольорами драйвер принтера перетворює RGB-малюнок у модель СМУК. Однак багато відтінків, створених в кольоровій системі RGB, не вдається передати при друці на принтері. А це означає, що колірне охоплення системи СМУК менше, ніж колірне охоплення системи RGB. Водночас варто зазначити, що лише частину кольорів, які зустрічаються в природі і сприймаються людським зором, можна відтворити на екрані монітора, тобто колірне охоплення моделі RGB вужче, ніж колірне охоплення людського ока. Як видно, жодна з моделей не є повною за колірним охопленням. Під *колірним охопленням* розуміють діапазон кольорів, який може бути відтворений моделлю кольорів.

У типографіях кольорові зображення друкують у кілька етапів,

накладаючи по чергово на папір блакитний, пурпурний, жовтий і чорний відбитки. Так отримують повноколірну ілюстрацію. Тому готове зображення, отримане на комп'ютері перед друком, ділять на чотири складових одноколірових зображення. Цей процес називається діленням кольору (separations). Сучасні графічні редактори мають спеціальні засоби для виконання цієї операції. Ці програми самі визначають суміш СМУК.

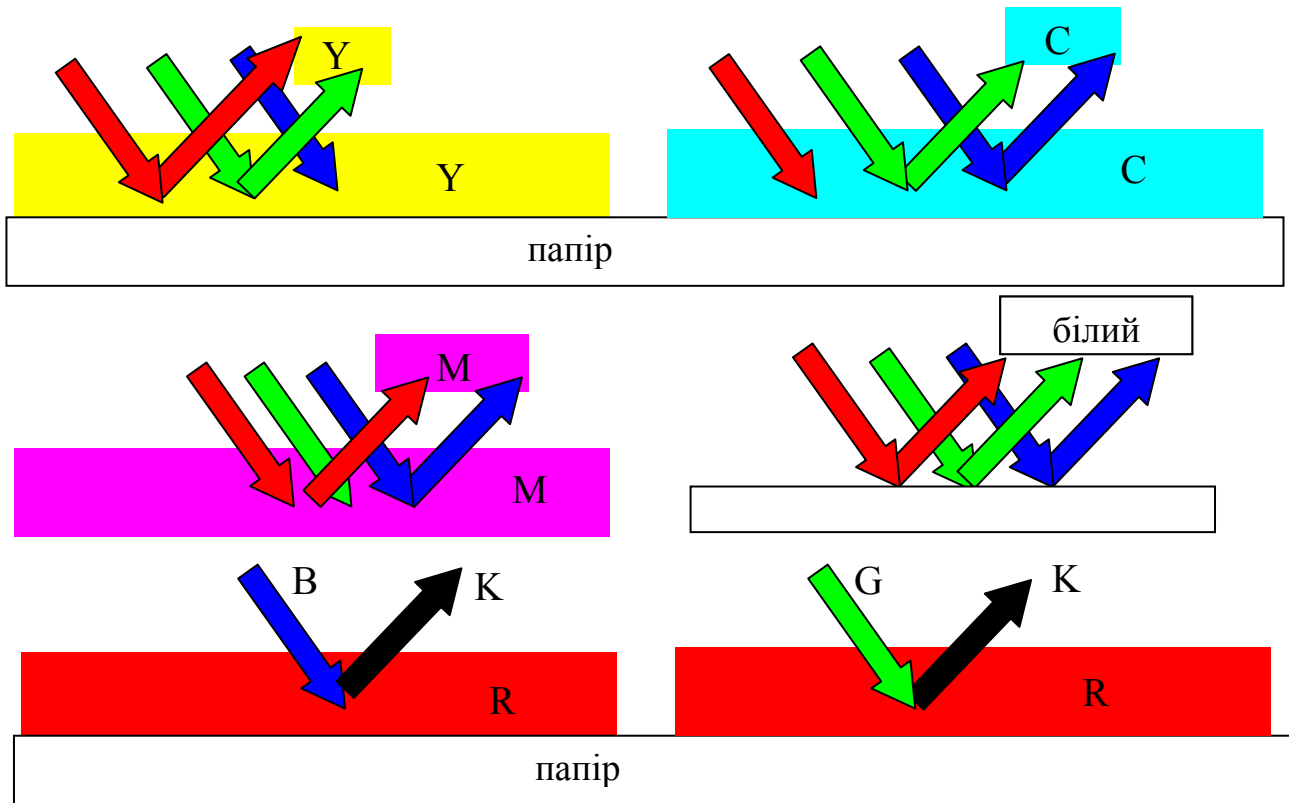


Рис. 3.9. Поглинання (віднімання) кольорів

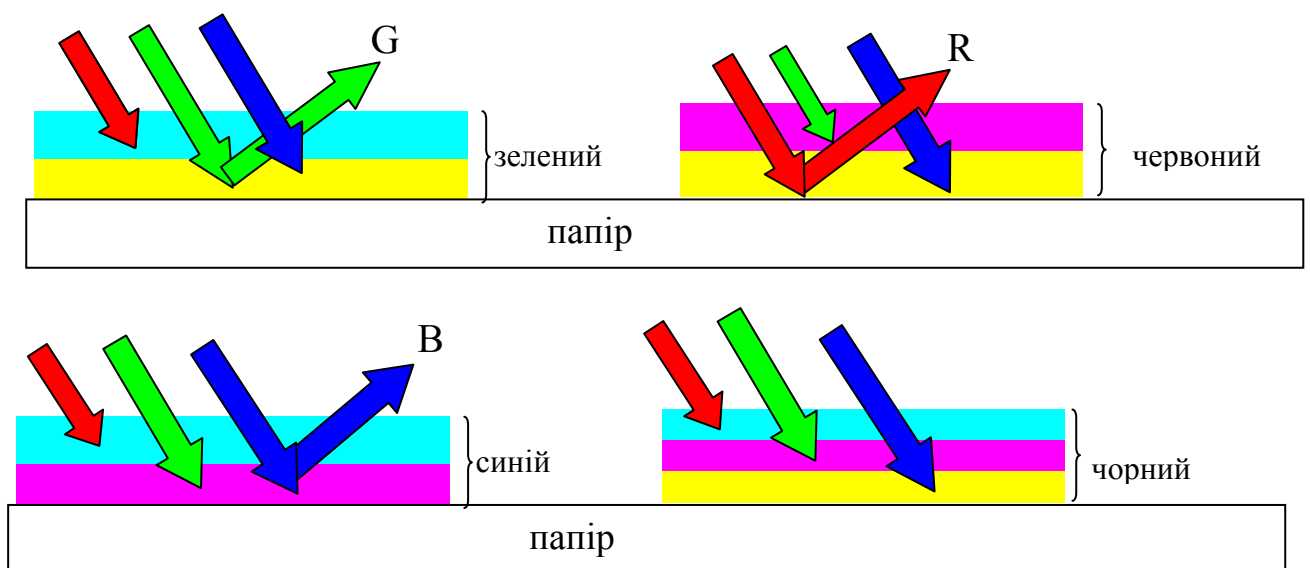


Рис. 3.10. Субтрактивність для двох і трьох кольорів

У лазерному принтері є свій “комп’ютер” із необхідними програмами, що виконують перетворення графічних даних у зображення на папері.

Кольорові принтери розділяють кольорові малюнки на 4 складові, а потім окремо друкують кожну частину на одному й тому ж аркуші паперу, тобто один аркуш проходить через принтер 4 рази. При цьому окремі кольорові точки, з яких складається малюнок, повинні бути трохи зсувеними одна від одної, щоб не було накладання кольорів.

Для переходу від моделі CMY до моделі CMYK використовують такі співвідношення:

$$K = \min(C, M, Y), \quad C = C - K, \quad M = M - K, \quad Y = Y - K.$$

### 3.2.3. Суб’єктивна модель кольорів HSB (HSV)

Моделі RGB, CMY, CMYK орієнтовані на роботу з технічними засобами. Якщо модель RGB найприйнятніша для комп’ютера, модель CMYK – для типографій, то модель HSB найзручніша для людини. Вона проста та інтуїтивно зрозуміла.

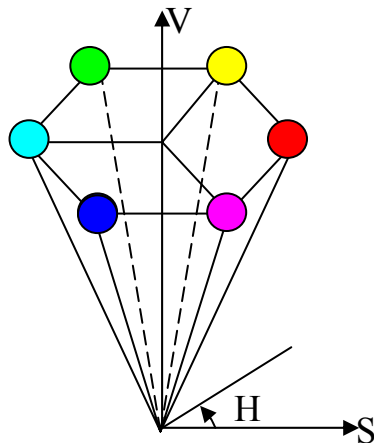


Рис. 3.11. Модель HSB

Ця модель дозволяє задавати кольори, опираючись на інтуїтивні поняття тону кольору H (Hue), насиченості кольору S (Saturation) та яскравості кольору B/V (Brightness/Value). Тому цю модель називають HSB або HSV. Регулюючи три згадані компоненти, можна отримати стільки ж кольорів, як і при роботі з іншими моделями.

Деякі графічні редактори дозволяють працювати з моделлю кольорів HSB. Модель HSB зручна для застосування в тих графічних редакторах, які зорієнтовані не на обробку готових зображень, а для створення власних художніх творів.

У цій моделі використовується циліндрична система координат, а множина всіх допустимих кольорів є конусом, покладеним на вершину (рис. 3.11). Основа конуса – яскраві кольори, що відповідають значенню  $V=1$  (конус має одиничну висоту).

Значення H змінюється в градусах від  $0^0$  до  $360^0$ , оскільки кольори веселки розміщуються на колі в такому порядку: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий. Червоному кольору відповідає кут  $0^0$ , зеленому –  $120^0$  і т.д. Кольори, що доповнюють один одного до білого, на колі знаходяться навпроти. Величина S змінюється від 0 до 1. Значення  $V = 0$  відповідає чорному кольору. При  $S = 0$  (тобто на осі V) маємо сірі відтінки. Білий колір кодується як  $S = 0, V = 1$ . При  $S = 0$  значення H не має змісту.

Модель HSB зручна для вибору кольорів на екрані. Спочатку на екрані можна зобразити спрощену палітру, а потім збільшити або зменшити яскравість. Наприклад, так діють при моделюванні затінення об'єктів або сутінків.

Графічні редактори дозволяють працювати з кольоровими зображеннями в різних моделях. Наприклад, у Paint Brush for Windows для установки кольору використовуються дві моделі – RGB та HSV (існують відповідні формули зв'язку між параметрами R, G, B та H, S, V).

### 3.3. Баланс кольорів

Довільна зміна складової кольору впливає на загальний баланс кольорів, тобто зміна однієї компоненти обов'язково відбивається на інших кольорах. Тому в основі будь-якої корекції кольорів лежить налаштування не окремих кольорів, а балансу кольорів, причому одного й того ж результату можна досягти різними способами.

Щоб легше уявити взаємодію компонент кольору, необхідно розглянути спрощену схему колірної кола (рис. 3.12), яка дає можливість наочно продемонструвати взаємодію компонент балансу кольорів.

На схемі кожний колір знаходиться між двома кольорами, за допомогою яких він одержується. Наприклад, додавання зеленого і червоного кольорів дає жовтий. Щоб підсилити будь-який колір, потрібно послабити доповнювальний колір (він розміщений напроти на колірному колі). Наприклад, щоб змінити колір у бік блакитного тону, необхідно знизити в ньому вміст червоного кольору. Щоб зменшити фіолетову складову, можна зменшити її безпосередньо, але краще це зробити шляхом збільшення блакитної і жовтої складових, що дозволить зберегти насиченість зображення. Отже, щоб вплинути на фіолетовий колір, можна задіяти всі кольори кола.

Таким чином, при довільних впливах на компоненти кольору, необхідно врахувати, що це відбивається на всьому просторі кольорів. У зв'язку з цим необхідно зважати на такі закономірності:

- 1) кольори, що лежать на колі навпроти один одного, взаємно пов'язані (зменшення вмісту одного кольору збільшує вміст протилежного кольору);
- 2) вміст певного кольору можна змінити за рахунок впливу на сусідні кольори;
- 3) щоб збільшити вміст певного кольору, можна зменшити вміст кольорів, які сусідні із протилежним, і навпаки.

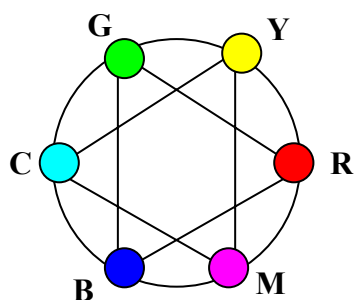


Рис. 3.12. Спрощена схема колірної кола

### 3.4. Кодування кольору. Палітра кольорів

Щоб комп'ютер мав можливість працювати з кольоровими зображеннями, необхідно вміти подавати кольори у вигляді чисел, тобто кодувати колір за допомогою комбінації бітів. Кількість бітів для подання кольору кожного пікселя, називається *бітовою глибиною*. Спосіб кодування кольору залежить від моделі кольорів та формату числових даних у комп'ютері.

Для моделі RGB кожен з компонент можна зобразити з допомогою чисел, обмежених певним діапазоном (наприклад, дробовими числами від 0 до 1 або цілими від 0 до деякого максимального значення). Зараз досить розповсюджений формат True Color (істинний колір), в якому під кожний піксель відводиться 24 біти, тобто кожна компонента подається у вигляді байта, що дає 256 градацій для кожної компоненти:  $R = 0 - 255$ ,  $G = 0 - 255$ ,  $B = 0 - 255$ . Це дає можливість закодувати  $256 \times 256 \times 256 = 2^{24} = 16777216$  градацій кольорів, що значно перевищує кількість кольорів, які розрізняє людське око. Такий спосіб кодування кольорів називається *компонентним*. У комп'ютері коди зображень True Color подаються трьома байтами (рис. 3.13) або упаковуються в довге ціле – 32 біти (так, наприклад, зроблено в API Windows).

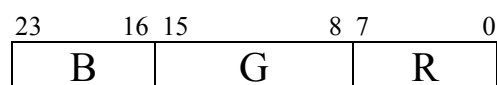


Рис. 3.13. 3-байтовий код

У 32-бітній моделі RGBA старші 8 бітів використовуються для задання компоненти маски (А-компоненти, або Alpha-каналу). Маска створюється деякими графічними програмами для спеціальних ефектів, наприклад для задання прозорості, туману.

Хоча немає видимих причин використовувати більше кольорів, реально використовуються 48-бітні і навіть 64-бітні моделі. Ці моделі використовуються в кольорових системах вищого рівня, зокрема в професійних графічних системах.

При роботі із зображеннями в системах комп'ютерної графіки часто доводиться шукати компроміс між якістю зображення (якомога більше кольорів) і ресурсами, необхідними для збереження зображення.

Якщо для кодування кольору виділити 1 біт, то можна закодувати 2 різних кольори (чорно-білий режим). Виділення одного байта дозволяє закодувати 256 різних відтінків кольорів. Два байти дозволяють визначити 65536 кольорів (рис. 3.14). Цей режим називається High Color.

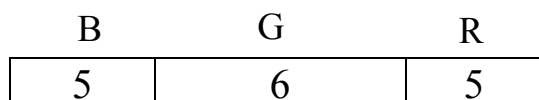


Рис. 3.14. 2-байтовий код

У випадку True Color/High Color кольорова палітра не потрібна, оскільки в трьох/двох байтах достатньо інформації про колір пікселя.

При обмеженні кількості кольорів, тобто для зменшення обсягу пам'яті використовують палітру. *Кольорова палітра* – це набір кольорів. *Палітру* можна сприймати як таблицю кольорів, у якій указано індекс (номер) кольору та сам код того чи іншого кольору. Кожен кольоровий відтінок задають одним числом, причому це число визначає не код кольору, а номер кольору в таблиці. Сам колір визначається за цим номером у таблиці-палітрі. Ця таблиця зберігається разом із графічним файлом. Програма, що здійснює візуалізацію даних, читає з файла індекси і використовує відповідні їм кольори для зображення пікселів на екрані.

Різні зображення можуть мати різні кольорові палітри. Якщо відтворити зображення з іншою палітрою, то зелена ялинка може стати рожевою (в різних палітрах під однаковим номером можуть зберігатися різні кольори). У зв'язку з цим виникає проблема відповідності кольорів при перегляді Web-графіки. Для оформлення Web-сторінок не застосовують графіку, що має кодування кольору вище 8 бітів через невисоку швидкість передачі даних в Internet.

Зважаючи на це, було прийнято рішення – всі браузері (програми перегляду Web-сторінок) завчасно налаштовувати на певну фіксовану Web-палітру. У цій палітрі не 256 кольорів, які дозволяє кодувати 8 бітів, а лише 216. Це пов'язано з тим, що в Інтернеті працюють з різними комп'ютерами і не всі комп'ютери можуть відтворити 256 кольорів. Якщо розробник Web-сторінки використовуватиме лише цю палітру при створенні ілюстрації, то користувачі побачать малюнок правильно. Найбільш часто використовуються палітри з 16 та 256 кольорів. Як приклад наведемо стандартну палітру 16-кольорових відеорежимів VGA (табл. 3.1).

При 8-бітній глибині кольору можна задати 256 кольорів. Очевидно, що тут можна виділити під кожному компоненту певну кількість бітів (наприклад, для R – 3, для G – 3, для B – 2), але така технологія надто обмежує можливості передачі кольорів. Тому для такої малої глибини кольору краще використовувати інший підхід – із множини  $256 \times 256 \times 256$  кольорів вибираються довільні 256 кольорів, які нумеруються індексами від 0 до 255. Вибрані кольори записуються в таблицю кольорів (палітру), а у відеопам'яті замість коду кольорів записується 8-бітний індекс (номер кольору), який при візуалізації автоматично замінюється кольором, який у палітрі відповідає цьому індексу.

У графічних системах, наприклад OpenGL, для роботи з палітрами кольорів є спеціальні оператори. З їх допомогою можна створити палітру, вказавши для кожного індексу набір R, G, B компонент кольору і в будь-який момент можна вибрати довільний індексний колір із палітри.

Таблиця 3.1

Номер кольору	R	G	B	Назва кольору	Колір
0	0	0	0	Чорний	
1	128	0	0	Темно-червоний	
2	0	128	0	Зелений	
3	128	128	0	Коричн.-зелений	
4	0	0	128	Темно-синій	
5	128	0	128	Темно-пурпурний	
6	0	128	128	Синьо-зелений	
7	128	128	128	Сірий 50%	
8	192	192	192	Сірий 25%	
9	255	0	0	Червоний	
10	0	255	0	Яскраво-зелений	
11	255	255	0	Жовтий	
12	0	0	255	Синій	
13	255	0	255	Фіолетовий	
14	0	255	255	Блакитний	
15	255	255	255	Білий	

У реальних додатках, що працюють із палітрами кольорів, часто виникає задача створення такої палітри, яка б рівномірно охоплювала весь спектр моделі кольорів RGB.

**Задача.** З усіх  $(256)^3$  кольорів рівномірно вибрати 256 кольорів і призначити їм відповідні індекси.

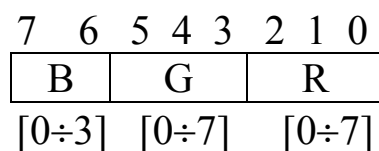


Рис. 3.15. Підіндекси компонент R,G,B

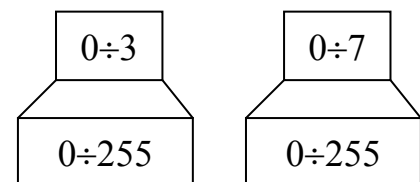


Рис. 3.16. Відображення інтервалів

**Розв'язування.** Розіб'ємо поле індексу справа наліво на 3 підполя довжиною 3, 3 і 2 біти, відповідно (рис. 1.15). Ці поля визначатимуть підіндекси компонент R, G, B. Для компоненти B відведемо 2 біти, оскільки зміна синього кольору менше сприймається людським оком, ніж зміна кольорів R та G (колір B має найменший діапазон електромагнітних хвиль).

Таким чином, індекс кольору в палітрі  $I_c$  можна подати у вигляді

$$I_c = I_B \cdot 2^6 + I_G \cdot 2^3 + I_R, \quad (3.1)$$

де  $I_R, I_G, I_B$  – значення підіндексів.

Для вибору кольору потрібно рівномірно відобразити інтервали підіндексів  $[0, 3]$ ,  $[0, 7]$ ,  $[0, 7]$  на інтервал  $[0, 255]$  (рис. 3.16). Для компонент R і G одержуємо відповідно значення кольору  $[255 \times I_R/7]$  і  $[255 \times I_G/7]$ , а для компоненти B – значення  $[255 \times I_B/3]$ . Замість цілої частини можна брати найближче ціле.

Обчислимо, який колір буде відповідати в палітрі індексу 214. Число 214 розкладемо за формулою (3.1). Маємо  $214 = 3 \cdot 2^6 + 2 \cdot 2^3 + 6$ , тому  $I_R = 6$ ,  $I_G = 2$ ,  $I_B = 3$ . Тоді для компонентів кольору матимемо: R =  $[255 \times 6/7] = [218,57] = 218$ , G =  $[255 \times 2/7] = [72,86] = 72$ , B =  $[255 \times 3/3] = 255$ . Отже, індексу 214 в рівномірній палітрі з 256 кольорів відповідає колір (218, 72, 255).

### 3.5. Оптимальне поєднання кольорів при побудові зображень

Крім фізіологічного впливу кольору на нервову систему, колір характеризується психологічними та терапевтичними діями.

Розглянемо деякі аспекти психологічної дії кольору на людину. Досвід показує, що різні кольори по-різному діють на психіку людини.

Червоний і оранжевий кольори збуджують, стимулюють діяльність, сприяють короткочасному підвищенню продуктивності праці. Світло-сині тони створюють легкий настрій, темно-сині справляють холодне враження. Зелений колір – заспокійливий, приємно діє на очі, білий викликає відчуття холоду, фіолетовий колір – неспокійний (у Китаї – колір трауру), викликає негативні реакції, коричневий – м'який і затишний.

Наведені характеристики дії кольорів на психіку людини є основою для поділу кольорів на холодні та теплі. Холодні кольори (зелений, синій) заспокоюють, полегшують напруження очей, теплі (червоний, жовтий, оранжевий) потрібно розглядати як активні, динамічні. Холодні кольори створюють відчуття збільшеного простору (предмети ніби віддаляються), теплі – навпаки, зменшують зоровий простір. Предмети, зафарбовані теплими кольорами, здаються ближчими, а зафарбовані у світлий тон – більш легкими, і навпаки.

Зафарбовані об'єкти мають різний ступінь сприйняття кольорів. У різних експериментах отриманий такий порядок розрізнення кольорів (у порядку спадання):

- синій на білому;
- білий на темно-синьому;
- лимонно-жовтий на малиновому;
- чорний на білому;
- темно-синій на оранжевому (жовтогарячому);
- білий на червоному.

Найгірше розрізняють зелений колір на червоному фоні та червоний на зеленому.

Отже, перша вимога при роботі з кольором – це чіткість і зручність сприйняття зображення, що забезпечується оптимальним підбором його основних характеристик. Хоча треба зазначити, що сприйняття кольорів людиною є індивідуальним фактором.

При сучасних технічних характеристиках графічних кольорових моніторів можна істотно підвищити комфортність роботи з комп'ютером за допомогою раціонального поєднання кольорів. Сформулюємо найважливіші вимоги до роботи з кольором.

1. Не використовувати надто яскравих і насичених кольорів на великих поверхнях.
2. Не варто зафарбовувати великі поверхні яскраво-червоним кольором.
3. Уникати темних кольорів: фіолетового, коричневого, темно-сірого (часто трапляються в нашому буденному житті). Для зображення контрастних кольорів, краще вибрати світло-сірий фон.
4. Для предметів, що повинні найбільше привертати увагу, необхідно використовувати червоні, сині, зелені, жовті або білі кольори; яскраво-синій колір не годиться для зафарбовування малих графічних елементів.
5. Не слід використовувати кольори, які різко відрізняються за яскравістю, краще використати контраст тону кольорів.
6. Кольори, що використовуються, повинні викликати позитивні емоції, поліпшувати самопочуття, підвищувати працездатність. Наприклад, емоції комфорту стимулюються слабо насиченими синьо-зеленими кольорами. Темно-зелений, темно-фіолетовий кольори викликають негативні реакції.
7. Якщо яскравість об'єкта наближена до яскравості фону, то об'єкт важко розрізняється. Для фону необхідно вибирати кольори, які привертають до себе мінімум уваги. Наприклад, білі літери на синьому фоні найкраще сприймаються оком.
8. Ефект площини досягається за рахунок підбору кольорів, близьких за яскравістю та насиченістю.
9. Для динамічних зображень варто надавати перевагу основним кольорам: червоному, зеленому, блакитному. Для кодування статичних зображень бажано використовувати змішані кольори.

Використовуючи ці рекомендації у практичній діяльності, можна уникнути помилок при підборі кольорів для побудови зображень.

## Контрольні питання та завдання

1. Що таке колір? Як він утворюється?
2. Дайте визначення спектральної кривої.
3. Сформулюйте основні закони колориметрії.
4. В чому полягає суть трикомпонентної теорії кольору?
5. На які основні кольори розкладається біле світло?
6. Що таке колірна модель? Які ви знаєте колірні моделі? Яке призначення кожної колірної моделі?
7. Які кольори називаються доповнювальними?
8. Що таке колірне охоплення? Порівняйте цю властивість для різних моделей кольору.
9. Які атрибути використовує людина для оцінки кольору?
10. Що таке тон кольору? У чому полягає тонова корекція зображення?
11. Що характеризує яскравість/насиченість кольору?
12. Як можна змінити вміст певного кольору?
13. Що таке глибина кольору?
14. Яка максимальна кількість кольорів отримується при глибині кольору 16/24 біти?
15. Що таке палітра кольорів? Для чого вона використовується? Як утворити рівномірну палітру?
16. Скільки різних градацій сірого кольору має режим True Color?
17. Скільки різних градацій зеленого, червоного, синього може бути одержано в режимі High Color?
18. Які правила оптимального поєднання кольорів ви знаєте?

## Вправи і задачі для самостійного виконання

1. Визначити, який колір побачить людина при освітленні червоного паперу блакитним світлом.
2. Побудуйте спектральну криву для світло-червоного світла.
3. Записати формули для переходу від моделі RGB до моделі CMY в форматі True Color.
4. Записати координати HSB для світло-зеленого кольору.
5. Вивести формули для перетворення параметрів кольору RGB в HSV і навпаки.
6. Написати програму вибору кольорів, використовуючи три повзунки для задання HSV-компонент кольору.
7. Обчислити колір, який відповідатиме індексу 168 у рівномірній палітрі з 256 кольорів.
8. Нехай в повнокольоровій системі (24 біти на піксель) є буфер кадра  $512 \times 512$ . Скільки кольорів можна відобразити одночасно на екрані?