

Российский университет транспорта (МИИТ)

Институт транспортной техники и систем управления

Кафедра «Управление и защита информации»

Курсовая работа

по теме «Разработка структуры данных»

по дисциплине «Системы управления базами данных и основы
построения защищенных баз данных»

Выполнил:

Студент группы ТКИ-441 Ковров А.И.

Проверил:

к.т.н. доц. Васильева М.А.

Москва 2024

Оглавление

Задание на работу.....	3
UML-диаграмма классов приложения.....	5
Проверка утечек памяти.....	6
Результаты работы приложения.....	7
Заключение.....	9
Приложение А.....	10

Задание на работу

1. Для заданной структуры данных разработать API (программный интерфейс приложения, интерфейс прикладного программирования) (англ. application programming interface) — описание способов (набор классов, процедур, функций, структур или констант), которыми одна компьютерная программа может взаимодействовать с другой программой. На языке C++ написать конструктор и деструктор класса разрабатываемой структуры для типа `int`. Отладить программу.
2. Разработать метод вывода структуры в строку. Отладить приложение. Все изменения выложить в GitHub. Завести новый Pull request. Провести рефакторинг кода в соответствии с Issue.
3. Разработать все необходимые для заданной структуры методы для хранения и поиска (если задано) элемента типа `int`. Отладить приложение. Все изменения выложить в GitHub. Завести новый Pull request. Провести рефакторинг кода в соответствии с Issue.
4. Структура данных для любого типа данных, реализующая CRUD — акроним, обозначающий четыре базовые функции, используемые при работе с базами данных: создание (англ. create), чтение (read), модификация (update), удаление (delete). Отладить приложение. Все изменения выложить в GitHub. Завести новый Pull request. Провести рефакторинг кода в соответствии с Issue.
5. Переопределение оператора сдвига. Переопределить операторы сдвига для реализации удобного взаимодействия с потоком ввода/вывода. Реализовать (не в библиотеке классов) методы ввода/вывода структуры из/в консоль и файл, используя операторы сдвига. Отладить приложение. Все изменения выложить в GitHub. Завести новый Pull request. Провести рефакторинг кода в соответствии с Issue.

6. Тесты. Разработать тесты на конструктор и деструктор. Тесты положить в отдельную папку с названием Tests. Отладить приложение. Все изменения выложить в GitHub. Завести новый Pull request. Провести рефакторинг кода в соответствии с Issue.
7. Полное тестирование приложения. Разработать тесты на все публичные методы разрабатываемой структуры данных. Отладить приложение. Все изменения выложить в GitHub. Завести новый Pull request. Провести рефакторинг кода в соответствии с Issue.
8. Отчет по лабораторной работе "Разработка структуры данных"
Разработать отчет по лабораторной работе по ГОСТ НИР 2017 (<http://docs.cntd.ru/document/1200157208>). Отчет должен содержать:
 1. Задание на работу
 2. UML-диаграмму классов приложения
 3. Листинг готового приложения в текстовом формате. Для текста кода использовать шрифт "Courier New" или "Consolas" размером 11 пт с однострочным интервалом. Программу перед этим отформатировать.
 4. Результаты работы приложения в виде снимков экрана. Все рисунки должны быть крупными и четкими, иметь подписи в соответствии с ГОСТ НИР 2017. Цвет фона рисунка должен быть белым, цвет шрифта - черным.

UML-диаграмма классов приложения

Диаграмма классов представлена на рисунке 1.

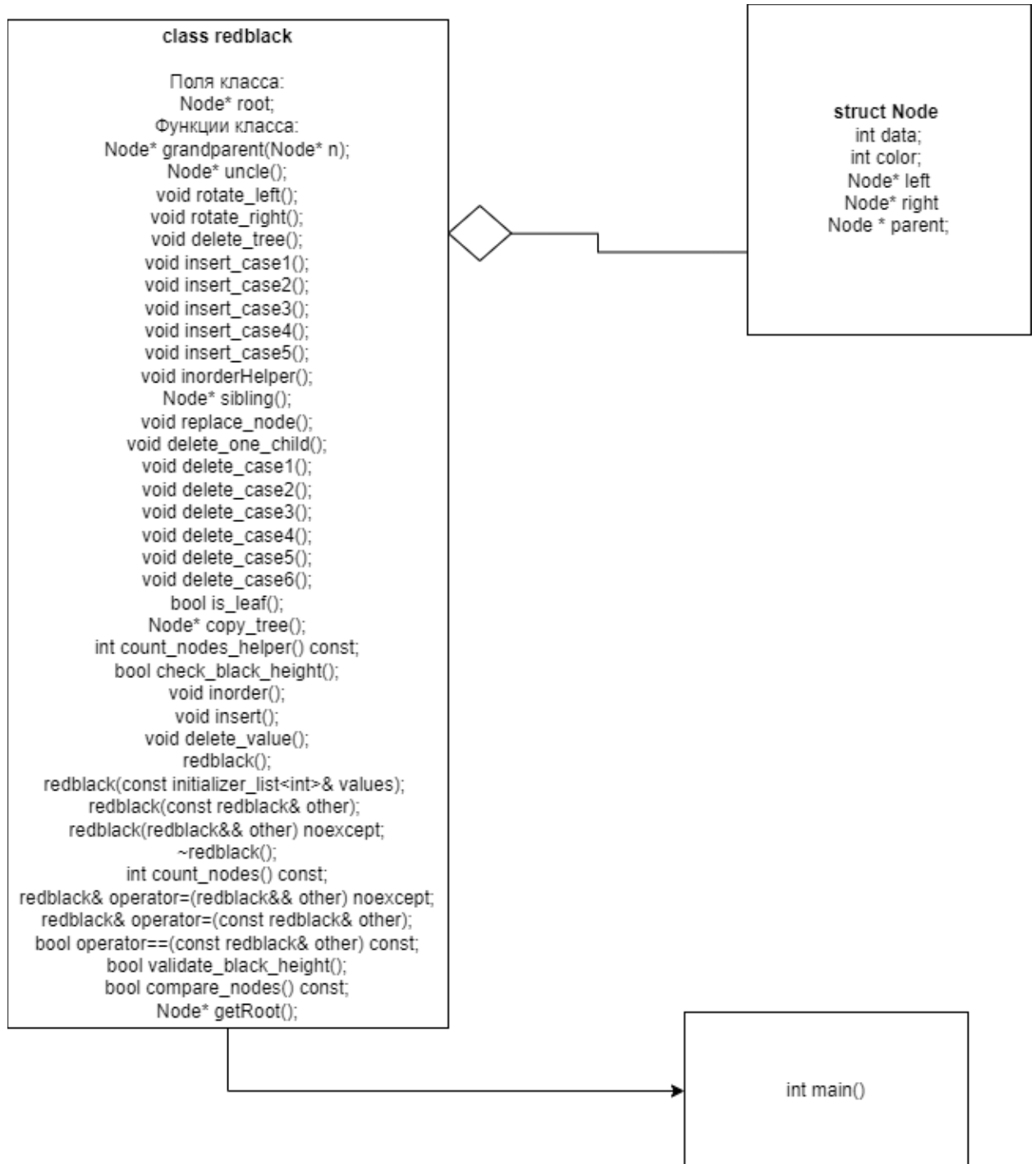
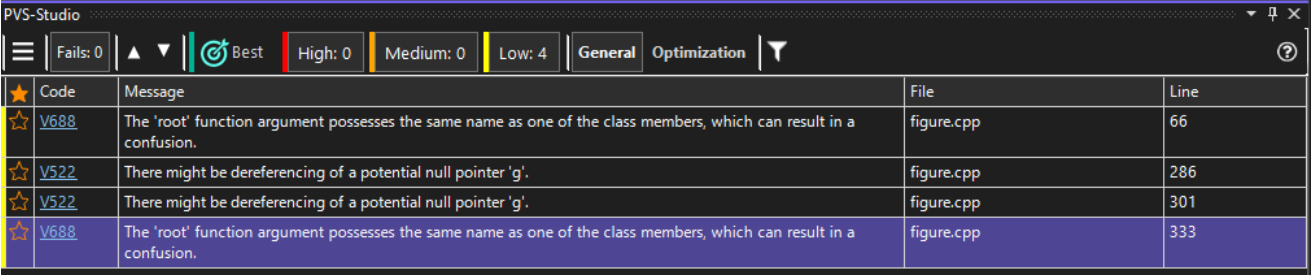


Рисунок 1 – Диаграмма классов

Проверка утечек памяти



The screenshot shows the PVS-Studio interface with a table of error messages. The table has four columns: a star icon, Code, Message, File, and Line. The messages are related to variable naming and dereferencing. The last row is highlighted in blue.

★	Code	Message	File	Line
☆	V688	The 'root' function argument possesses the same name as one of the class members, which can result in a confusion.	figure.cpp	66
☆	V522	There might be dereferencing of a potential null pointer 'g'.	figure.cpp	286
☆	V522	There might be dereferencing of a potential null pointer 'g'.	figure.cpp	301
☆	V688	The 'root' function argument possesses the same name as one of the class members, which can result in a confusion.	figure.cpp	333

Рисунок 2 – Вывод PVS-Studio

Результаты работы приложения

```
int main()
{
    redblack tree;

    // Вставляем данные
    tree.insert(1);
    tree.insert(6);
    tree.insert(8);
    tree.insert(11);
    tree.insert(13);
    tree.insert(17);
    tree.insert(15);
    tree.insert(25);
    tree.insert(22);
    tree.insert(27);

    std::cout << "Inorderrrr traversal of created Tree\n";
    tree.inorder();

    tree.delete_value(1);
    tree.inorder();
    if (tree.validate_black_height(tree.getRoot())) {
        cout << "Black height property is valid." << endl;
    }
    else {
        cout << "Black height property is violated." << endl;
    }
}
```

Рисунок 3 – Команды для выполнения

```

Inorderrrr traversal of created Tree
Red-Black Tree:
R----11(BLACK)
  L----6(BLACK)
    |  L----1(BLACK)
    |  R----8(BLACK)
  R----15(BLACK)
    L----13(BLACK)
    R----22(RED)
      L----17(BLACK)
      R----25(BLACK)
        R----27(RED)
Red-Black Tree:
R----15(BLACK)
  L----11(BLACK)
    |  L----6(BLACK)
    |  |  R----8(RED)
    |  R----13(BLACK)
  R----22(BLACK)
    L----17(BLACK)
    R----25(BLACK)
      R----27(RED)
Black height property is valid.

```

Рисунок 4 – Вывод программы

Заключение

В ходе курсовой работы было разработано API для структуры данных «Красно-черное дерево». Были изучены основы ООП программирования и основы СУБД. В рамках работы также была изучена работа с тестами в Visual Studio и работа с Git Bash.

Приложение А

Листинг приложения

root.h

```
#pragma once
struct Node {
    int data;
    int color;          // RED - 0 | BLACK - 1
    Node* left, * right, * parent;

    Node(int data) : data(data), color(0), left(nullptr), right(nullptr),
parent(nullptr) {}
};
```


main.cpp

```
// This is a personal academic project. Dear PVS-Studio, please check it.

// PVS-Studio Static Code Analyzer for C, C++, C#, and Java: https://pvs-studio.com

#include <iostream>
#include "../triangle/figure.h"

/**
 * @brief Point of entering the programm
 * @return 0 in case of unluck
 */

int main()
{
    redblack tree;

    // Вставляем данные
    tree.insert(1);
    tree.insert(6);
    tree.insert(8);
    tree.insert(11);
    tree.insert(13);
    tree.insert(17);
    tree.insert(15);
    tree.insert(25);
    tree.insert(22);
    tree.insert(27);

    std::cout << "Inorderrrr traversal of created Tree\n";
    tree.inorder();

    tree.delete_value(1);
    tree.inorder();
    if (tree.validate_black_height(tree.getRoot())) {
        cout << "Black height property is valid." << endl;
    }
    else {
        cout << "Black height property is violated." << endl;
    }
}
```

```
return 0;
```

```
}
```

figure.cpp

// This is a personal academic project. Dear PVS-Studio, please check it.

// PVS-Studio Static Code Analyzer for C, C++, C#, and Java: <https://pvs-studio.com>

```
#include <stdexcept>
```

```
#include <cmath>
```

```
#include "figure.h"
```

```
#include <sstream>
```

```
#include <iostream>
```

```
using namespace std;
```

```
/*
```

```
*@brief конструктор обычный
```

```
*/
```

```
redblack::redblack()
```

```
{
```

```
    root = nullptr;
```

```
}
```

```
/*
```

```
*@brief деструктор
```

```
*/
```

```

redblack::~~redblack()
{
    delete_tree(root);
}

/*
 * @brief подсчет количества элементов дерева
 * @return количество элементов
 */
int redblack::count_nodes() const
{
    return count_nodes_helper(root);
}

redblack& redblack::operator=(redblack&& other) noexcept
{
    if (this != &other) {
        delete_tree(root);
        root = other.root;
        other.root = nullptr;
    }
    return *this;
}

redblack& redblack::operator=(const redblack& other)
{
    if (this != &other) {
        delete_tree(root);
    }
}

```

```

        root = copy_tree(other.root, nullptr);
    }
    return *this;
}

bool redblack::operator==(const redblack& other) const
{
    return compare_nodes(root, other.root);
}

bool redblack::validate_black_height(Node* root)
{
    int expected_black_count = -1;
    return check_black_height(root, 0, expected_black_count);
}

bool redblack::compare_nodes(const Node* a, const Node* b) const
{
    if (a == nullptr && b == nullptr) {
        return true;
    }
    if (a == nullptr || b == nullptr) {
        return false;
    }
    return (a->data == b->data) && (a->color == b->color) &&
compare_nodes(a->left, b->left) && compare_nodes(a->right, b->right);
}

Node* redblack::getRoot()

```



```

{
    return root;
}

/*
 *@brief функция для вставки новых корней дерева
 */

void redblack::insert(int value) {
    Node* newNode = new Node(value);

    if (root == nullptr) {
        root = newNode;
        insert_case1(newNode);
        return;
    }

    Node* current = root;
    Node* parent = nullptr;

    while (current != nullptr) {
        parent = current;
        if (value == current->data) {
            cout << "Duplicate value: " << value << endl;
            delete newNode;
            return;
        }
        else if (value < current->data) {
            current = current->left;
        }
    }

```

```

        else {
            current = current->right;
        }
    }
}

```

```

newNode->parent = parent;

```

```

if (value < parent->data) {
    parent->left = newNode;
}
else {
    parent->right = newNode;
}

```

```

insert_case1(newNode);
}

```

```

/*

```

```

 *@brief функция для удаления корня дерева

```

```

*/

```

```

void redblack::delete_value(int value)

```

```

{

```

```

    Node* nodeToDelete = root;

```

```

    while (nodeToDelete != nullptr && nodeToDelete->data != value) {

```

```

        if (value < nodeToDelete->data) {

```

```

            nodeToDelete = nodeToDelete->left;

```

```

        }

```

```

        else {

```

```

        nodeToDelete = nodeToDelete->right;
    }
}

if (nodeToDelete == nullptr) {
    cout << "Value " << value << " not found in the tree." << endl;
    return;
}

if (!is_leaf(nodeToDelete->left) && !is_leaf(nodeToDelete->right))
{
    Node* successor = nodeToDelete->right;
    while (successor->left != nullptr)
    {
        successor = successor->left;
    }
    nodeToDelete->data = successor->data;
    nodeToDelete = successor;
}

delete_one_child(nodeToDelete);
}

/*
 * @brief функция для поиска деда корня (корень->parent->parent)
 * @return Node * n->parent->parent
 */

Node* redblack::grandparent(Node* n) {

```

```

    if ((n != nullptr) && (n->parent != nullptr)) {
        return n->parent->parent;
    }
    return nullptr;
}

```

```

/*

```

```

 * @brief поиск дяди корня (брат отца)

```

```

 * @return Node * n->parent->other_child

```

```

 */

```

```

Node* redblack::uncle(Node* n) {

```

```

    Node* g = grandparent(n);

```

```

    if (g == nullptr) return nullptr;

```

```

    if (n->parent == g->left) {

```

```

        return g->right;

```

```

    }

```

```

    return g->left;

```

```

}

```

```

/*

```

```

 * @brief поворот дерева относительно узла n против часовой стрелки
 (налево)

```

```

 */

```

```

void redblack::rotate_left(Node* n) {

```

```

    Node* pivot = n->right;

```

```

    pivot->parent = n->parent;

```

```

    if (n->parent == nullptr) {

```

```

        root = pivot;

```

```

    }
    else if (n->parent->left == n) {
        n->parent->left = pivot;
    }
    else {
        n->parent->right = pivot;
    }

```

```

n->right = pivot->left;
if (pivot->left != nullptr) {
    pivot->left->parent = n;
}

```

```

n->parent = pivot;
pivot->left = n;
}

```

```

/*

```

*@brief поворот дерева относительно узла n по часовой стрелке
(направо)

```

*/

```

```

void redblack::rotate_right(Node* n) {
    Node* pivot = n->left;
    pivot->parent = n->parent;
    if (n->parent == nullptr) {
        root = pivot;
    }
    else if (n->parent->left == n) {
        n->parent->left = pivot;
    }
}

```

```

    }
    else {
        n->parent->right = pivot;
    }

    n->left = pivot->right;
    if (pivot->right != nullptr) {
        pivot->right->parent = n;
    }

    n->parent = pivot;
    pivot->right = n;
}

/*
 *@brief вспомогательная функция для удаления дерева
 */
void redblack::delete_tree(Node* node)
{
    if (node != nullptr) {
        delete_tree(node->left);
        delete_tree(node->right);
        delete node;
    }
}

/*

```

*@brief балансировка дерева после добавления нового узла случай 1
(теория для этого взята из википедии)

*/

```
void redblack::insert_case1(Node* n) {  
    if (n->parent == nullptr) {  
        n->color = 1; // Корень всегда черный  
        root = n;  
    }  
    else {  
        insert_case2(n);  
    }  
}
```

/*

*@brief балансировка дерева после добавления нового узла случай 2
(теория для этого взята из википедии)

*/

```
void redblack::insert_case2(Node* n) {  
    if (n->parent->color == 1) return; // Дерево корректно  
    insert_case3(n);  
}
```

/*

*@brief балансировка дерева после добавления нового узла случай 3
(теория для этого взята из википедии)

*/

```
void redblack::insert_case3(Node* n) {  
    Node* u = uncle(n);  
    Node* g;
```

```

if ((u != nullptr) && (u->color == 0)) {
    n->parent->color = 1;
    u->color = 1;
    g = grandparent(n);
    g->color = 0;
    insert_case1(g);
}
else {
    insert_case4(n);
}
}

```

/*

*@brief балансировка дерева после добавления нового узла случай 4
(теория для этого взята из википедии)

*/

```

void redblack::insert_case4(Node* n) {
    Node* g = grandparent(n);

    if ((n == n->parent->right) && (n->parent == g->left)) {
        rotate_left(n->parent);
        n = n->left;
    }
    else if ((n == n->parent->left) && (n->parent == g->right)) {
        rotate_right(n->parent);
        n = n->right;
    }
    insert_case5(n);
}

```



```
}
```

```
/*
```

```
 *@brief балансировка дерева после добавления нового узла случай 5  
 (теория для этого взята из википедии)
```

```
*/
```

```
void redblack::insert_case5(Node* n) {
```

```
    Node* g = grandparent(n);
```

```
    if (g == nullptr) return;
```

```
    n->parent->color = 1;
```

```
    g->color = 0;
```

```
    if ((n == n->parent->left) && (n->parent == g->left)) {
```

```
        rotate_right(g);
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        rotate_left(g);
```

```
    }
```

```
}
```

```
/*
```

```
 *@brief вспомогательная функция для красивого вывода целого дерева
```

```
*/
```

```
void redblack::inorderHelper(Node* root, string indent, bool last) {
```

```
    if (root != nullptr) {
```

```
        cout << indent;
```

```
        if (last) {
```

```
            cout << "R----";
```

```

        indent += "  ";
    }
    else {
        cout << "L----";
        indent += "| ";
    }
    string sColor = (root->color == 0) ? "RED" : "BLACK";
    cout << root->data << "(" << sColor << ")" << endl;
    inorderHelper(root->left, indent, false);
    inorderHelper(root->right, indent, true);
}
}

```

```

/*
 * @brief функция для поиска брата узла
 * @return Node* брат узла
 */

```

```

Node* redblack::sibling(Node* n)
{
    if (n == n->parent->left)
        return n->parent->right;
    else
        return n->parent->left;
}

```

```

void redblack::replace_node(Node* n, Node* child)
{
    if (n->parent == nullptr) {
        root = child;
    }
}

```

```

    }
    else if (n == n->parent->left) {
        n->parent->left = child;
    }
    else {
        n->parent->right = child;
    }

    if (child != nullptr) {
        child->parent = n->parent;
    }
}

void redblack::delete_one_child(Node* n)
{
    Node* child = (n->right != nullptr) ? n->right : n->left;

    if (child != nullptr) {
        replace_node(n, child);
        if (n->color == 1) {
            if (child->color == 0) {
                child->color = 1;
            }
            else {
                delete_case1(child);
            }
        }
    }
}

else if (n->parent == nullptr) {

```

```

        root = nullptr;
    }
    else {
        if (n->color == 1) {
            delete_case1(n);
        }
        replace_node(n, nullptr);
    }

    delete n;
}

```

```

/*
 *@brief балансировка дерева после удалении узла случай 1 (теория для
ЭТОГО взята из википедии)
 */

```

```

void redblack::delete_case1(Node* n)
{
    if (n->parent != nullptr)
        delete_case2(n);
}

```

```

/*
 *@brief балансировка дерева после удалении узла случай 2 (теория для
ЭТОГО взята из википедии)
 */

```

```

void redblack::delete_case2(Node* n)

```

```

{
    Node* s = sibling(n);

    if (s->color == 0) {
        n->parent->color = 0;
        s->color = 1;
        if (n == n->parent->left)
            rotate_left(n->parent);
        else
            rotate_right(n->parent);
    }
    delete_case3(n);
}

```

/*

*@brief балансировка дерева после удаления узла случай 3 (теория для
этого взята из википедии)

*/

```

void redblack::delete_case3(Node* n)
{
    Node* s = sibling(n);

    if (s == nullptr) return;

    if ((n->parent->color == 1) && (s->color == 1) && (s->left == nullptr ||
s->left->color == 1) && (s->right == nullptr || s->right->color == 1)) { s->color =
0;

        delete_case1(n->parent);
    }
}

```

```

else {
    delete_case4(n);
}
}

```

```

/*

```

```

    *@brief балансировка дерева после удаления узла случай 4 (теория для
    ЭТОГО взята из википедии)

```

```

    */

```

```

void redblack::delete_case4(Node* n)

```

```

{

```

```

    Node* s = sibling(n);

```

```

    if ((n->parent->color == 0) && (s->color == 1) && (s->left->color == 1)
    && (s->right->color == 1))

```

```

    {

```

```

        s->color = 0;

```

```

        n->parent->color = 1;

```

```

    }

```

```

    else

```

```

        delete_case5(n);

```

```

    }

```

```

/*

```

```

    *@brief балансировка дерева после удаления узла случай 5 (теория для
    ЭТОГО взята из википедии)

```

```

    */

```

```

void redblack::delete_case5(Node* n)

```

```

{
    Node* s = sibling(n);

    if (s->color == 1) {
        if ((n == n->parent->left) && (s->right->color == 1) && (s->left-
>color == 0))
        {
            s->color = 0;
            s->left->color = 1;
            rotate_right(s);
        }
        else if ((n == n->parent->right) && (s->left->color == 1) && (s->right-
>color == 0))
        {
            s->color = 0;
            s->right->color = 1;
            rotate_left(s);
        }
    }
    delete_case6(n);
}

```

/*

*@brief балансировка дерева после удалении узла случай 6 (теория для
этого взята из википедии)

*/

void redblack::delete_case6(Node* n)

```

{
    Node* s = sibling(n);

```

```
s->color = n->parent->color;
n->parent->color = 1;
```

```
if (n == n->parent->left) {
    s->right->color = 1;
    rotate_left(n->parent);
}
else {
    s->left->color = 1;
    rotate_right(n->parent);
}
}
```

```
/*
```

```
*@brief проверка на то, является ли узел листом (последним в ветви)
```

```
*/
```

```
bool redblack::is_leaf(Node* n)
```

```
{
    return n == nullptr || (n->left == nullptr && n->right == nullptr);
}
```

```
/*
```

```
*@brief вывод дерева в консоль
```

```
*/
```

```
void redblack::inorder() {
```

```
    if (root == nullptr)
        cout << "Tree is empty." << endl;
```



```

else {
    cout << "Red-Black Tree:" << endl;
    inorderHelper(root, "", true);
}
}

/*
 *@brief Конструктор с инициализатором списка
 */
redblack::redblack(const initializer_list<int>& values) : root(nullptr) {
    for (int value : values) {
        insert(value);
    }
}

/*
 *@brief Конструктор копирования
 */
redblack::redblack(const redblack& other) : root(nullptr) {
    root = copy_tree(other.root, nullptr);
}

/*
 *@brief Вспомогательная функция для копирования дерева
 */
Node* redblack::copy_tree(Node* other_root, Node* parent) {
    if (!other_root) return nullptr;

    Node* new_node = new Node(other_root->data);

```

```

    new_node->color = other_root->color;
    new_node->parent = parent;
    new_node->left = copy_tree(other_root->left, new_node);
    new_node->right = copy_tree(other_root->right, new_node);
    return new_node;
}

/*
 *@brief Вспомогательная функция для подсчета узлов дерева
 */
int redblack::count_nodes_helper(Node* node) const
{
    if (node == nullptr) {
        return 0;
    }
    return 1 + count_nodes_helper(node->left) + count_nodes_helper(node-
>right);
}

bool redblack::check_black_height(Node* node, int current_black_count,
int& expected_black_count)
{
    if (node == nullptr) {
        if (expected_black_count == -1) {
            expected_black_count = current_black_count;
            return true;
        }
        return current_black_count == expected_black_count;
    }
}

```

```
if (node->color == 1) {  
    current_black_count++;  
}
```

```
    bool left_check = check_black_height(node->left, current_black_count,  
expected_black_count);  
    bool right_check = check_black_height(node->right, current_black_count,  
expected_black_count);  
  
    return left_check && right_check;  
}
```

```
/*  
*@brief Конструктор перемещения  
*/  
redblack::redblack(redblack&& other) noexcept : root(other.root) {  
    other.root = nullptr;  
}
```

figure.h

```
// This is a personal academic project. Dear PVS-Studio, please check it.

// PVS-Studio Static Code Analyzer for C, C++, C#, and Java: https://pvs-studio.com

#pragma once
#include "../struckk/rooot.h"

using namespace std;

/*
 * @brief Class Figure
 */

class redblack
{
private:

    Node* root;

    /*
     * @brief функция для поиска деда корня (корень->parent->parent)
     * @return Node * n->parent->parent
     */

    Node* grandparent(Node* n);
    /*
     * @brief поиск дяди корня (брат отца)
     * @return Node * n->parent->other_child
     */
    Node* uncle(Node* n);
    /*
     * @brief поворот дерева относительно узла n против часовой
стрелки (налево)
     */
    void rotate_left(Node* n);
    /*
     * @brief поворот дерева относительно узла n по часовой стрелке
(направо)
```

```

*/
void rotate_right(Node* n);
/*
@brief вспомогательная функция для удаления дерева
*/
void delete_tree(Node* node);
/*
* @brief Вставка, случай 1 из википедии: N – корень
* @param n Вставляемый узел
*/
void insert_case1(Node* n);
/*
* @brief Вставка, случай 2 из википедии: P – чёрный
* @param n Вставляемый узел
*/
void insert_case2(Node* n);
/*
* @brief Вставка, случай 3 из википедии: U – красный
* @param n Вставляемый узел
*/
void insert_case3(Node* n);
/*
* @brief Вставка, случай 4 из википедии: N – правый потомок P, P
- левый потомок G
* @param n Вставляемый узел
*/
void insert_case4(Node* n);
/*
* @brief Вставка, случай 5 из википедии: N – левый потомок P, P
- левый потомок G
* @param n Вставляемый узел
*/
void insert_case5(Node* n);
/*
@brief вспомогательная функция для красивого вывода целого
дерева
@param root – корень дерева, indent – строка для вывода, last –
для прехеода налево или направо
*/
void inorderHelper(Node* root, string indent, bool last);
/*
@brief функция для поиска брата узла
* @return Node* брат узла
*/

```

```

Node* sibling(Node* n);

void replace_node(Node* n, Node* child);
/*
 * @brief Удаляет одного потомка узла
 * @param n Узел, у которого необходимо удалить потомка
 */
void delete_one_child(Node* n);
/*
 * @brief Удаление, случай 1 из википедии: N – новый корень
 * @param n Удаляемый узел
 */
void delete_case1(Node* n);
/*
 * @brief Удаление, случай 2 из википедии: S – красный
 * @param n Удаляемый узел
 */
void delete_case2(Node* n);
/*
 * @brief Удаление, случай 3 из википедии: P, S и дети S – черные
 * @param n Удаляемый узел
 */
void delete_case3(Node* n);
/*
 * @brief Удаление, случай 4 из википедии: S и его дети черные,
но P – красный
 * @param n Удаляемый узел
 */
void delete_case4(Node* n);
/*
 * @brief Удаление, случай 5 из википедии: S – черный, левый
потомок S – красный, правый потомок S – черный, N является левым потомком своего
отца
 * @param n Удаляемый узел
 */
void delete_case5(Node* n);
/*
 * @brief Удаление, случай 6 из википедии: S – черный, правый
потомок S – красный, N является левым потомком своего отца
 * @param n Удаляемый узел
 */
void delete_case6(Node* n);
/*

```

ветви)

```
    * @brief проверка на то, является ли узел листом (последним в
    ветви)

    * @return true or false
    */
    bool is_leaf(Node* n);
    /*
    * @brief Вспомогательная функция для копирования дерева
    * @return копия узла
    */
    Node* copy_tree(Node* other_root, Node* parent);
    /*
    * @brief вспомогательная функция для подсчета узлов дерева
    * @param текущий узел
    * @return результат сравнения
    */
    int count_nodes_helper(Node* node) const;
    /*
    * @brief вспомогательная функция для подсчета черных корней
    * @param текущий узел счетчик и текущий максимум
    * @return true or false
    */
    bool check_black_height(Node* node, int current_black_count,
    int& expected_black_count);
```

```
public:
    /*
    * @brief вывод дерева в консоль
    */
    void inorder();
    /*
    * @brief функция для вставки новых корней дерева
    */
    void insert(int value);
    /*
    * @brief функция для удаления узла дерева
    */
    void delete_value(int value);
    /*
    * @brief конструктор обычный
```

```

*/
redblack();
/*
@brief конструктор с инициализатором списка
*/
redblack(const initializer_list<int>& values);
/*
@brief конструктор копирования
*/
redblack(const redblack& other);
/*
@brief конструктор перемещения
*/
redblack(redblack&& other) noexcept; // Конструктор перемещения
/*
@brief деструктор
*/
~redblack();
/*
@brief подсчет количества элементов дерева
@return количество элементов
*/
int count_nodes() const;
/*
@brief перегрузка оператора присваивания
* @return сам объект для множественного присваивания
*/
redblack& operator=(redblack&& other) noexcept;
/*
@brief перегрузка оператора присваивания
* @return сам объект для множественного присваивания
*/
redblack& operator=(const redblack& other);
/*
* @brief Переопределение оператора равенства
* @param other Объект, с которым сравнивается данный
* @return результат сравнения
*/
bool operator==(const redblack& other) const;
/*
* @brief функция для проверки высоты дерева, что количество
черных узлов одинаково
* @param root - корень дерева
* @return true or false

```



```

    */
    bool validate_black_height(Node* root);
    /*
    * @brief функция для сравнения двух деревьев
    * @param a,b - ноды деревьев
    * @return true or false
    */
    bool compare_nodes(const Node* a, const Node* b) const;

    /*
    * @brief функция для сравнения двух деревьев
    * @return корень дерева
    */

    Node* getRoot();
};

```

Geo.Test.cpp

```
// This is a personal academic project. Dear PVS-Studio, please check it.

// PVS-Studio Static Code Analyzer for C, C++, C#, and Java: https://pvs-studio.com
```

```
#include "CppUnitTest.h"
#include "../triangle/figure.h"

using namespace Microsoft::VisualStudio::CppUnitTestFramework;

namespace GeoTests
{
    TEST_CLASS(GeoTests)
    {
    public:

    public:

        TEST_METHOD(Insert_SingleElement_RootIsCorrect)
        {
            redblack tree;
            tree.insert(10);

            Assert::IsNotNull(tree.getRoot());
            Assert::AreEqual(10, tree.getRoot()->data);
            Assert::AreEqual(1, tree.getRoot()->color);
        }

        TEST_METHOD>Delete_LeafNode_TreeRemainsValid)
        {
            redblack tree;
            tree.insert(10);
            tree.insert(5);
            tree.insert(15);

            tree.delete_value(5);

            Assert::IsNotNull(tree.getRoot());
            Assert::AreEqual(2, tree.count_nodes());
        }
    }
}
```

```

    }

    TEST_METHOD(Insert_Duplicates_NotAdded)
    {
        redblack tree;
        tree.insert(10);
        tree.insert(10);

        Assert::AreEqual(1, tree.count_nodes());
    }

    TEST_METHOD(BlackHeight_Validation)
    {
        redblack tree{ 10, 5, 15, 1, 7, 12, 18 };

        bool isValid = tree.validate_black_height(tree.getRoot());

        Assert::IsTrue(isValid, L"Tree does not maintain black-
height property");
    }

    TEST_METHOD(CopyConstructor_CreatesIdenticalTree)
    {
        redblack tree1{ 10, 5, 15, 1, 7, 12, 18 };
        redblack tree2 = tree1;

        Assert::IsTrue(tree1 == tree2);
    }

    TEST_METHOD(MoveConstructor_TreeTransferredCorrectly)
    {
        redblack tree1{ 10, 5, 15, 1, 7, 12, 18 };
        redblack tree2 = std::move(tree1);

        Assert::IsTrue(tree1.getRoot() == nullptr);
        Assert::AreEqual(7, tree2.count_nodes());
    }

    TEST_METHOD(DeleteValue_NotFound_NoCrash)
    {
        redblack tree{ 10, 5, 15 };

        tree.delete_value(20);
    }

```

```
        Assert::AreEqual(3, tree.count_nodes());
    }

    TEST_METHOD(Constructor_InitializerList_BuildsTree)
    {
        redblack tree{ 10, 5, 15, 1, 7, 12, 18 };

        Assert::AreEqual(7, tree.count_nodes());
    }

};

}
```