

Уменьшение цены абстракции при встраивании реляционного DSL в OCaml

Дмитрий Косарев

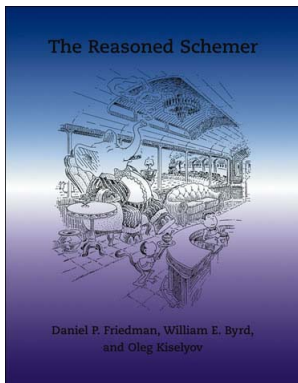
Лаборатория языковых инструментов

16 декабря, 2017

Реляционное программирование на miniKanren

От программ-функций к программам-отношениям:

$$f: X \rightarrow Y \rightsquigarrow f^o \subseteq X \times Y$$



- Изначально DSL для Scheme/Racket с довольно минималистичной реализацией
- Семейство языков (μ Kanren, α Kanren, cKanren, и т.д.)
- Встраивается как DSL в широкий набор языков (включая OCaml, Haskell, Scala, и т.д.)
- Daniel P. Friedman, William Byrd and Oleg Kiselyov. The Reasoned Schemer, The MIT Press, Cambridge, MA, 2005

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

`append: α list \rightarrow α list \rightarrow α list`

`appendo \subseteq α list \times α list \times α list`

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []       $\rightarrow$  ys  
  | h :: tl  $\rightarrow$   
    h :: (append tl ys)
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

`append: α list \rightarrow α list \rightarrow α list`

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []       $\rightarrow$  ys  
  | h :: tl  $\rightarrow$   
    h :: (append tl ys)
```

`appendo \subseteq α list \times α list \times α list`

```
let rec appendo xs ys xys =
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\text{append} : \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list}$

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []        $\rightarrow$  ys  
  | h :: tl  $\rightarrow$   
    h :: (append tl ys)
```

$\text{append}^o \subseteq \alpha \text{list} \times \alpha \text{list} \times \alpha \text{list}$

```
let rec appendo xs ys xys =  
  ((xs  $\equiv$  nil)  $\&\&$  (xys  $\equiv$  ys))
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\text{append} : \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list}$

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []        $\rightarrow$  ys  
  | h :: tl  $\rightarrow$   
    h :: (append tl ys)
```

$\text{append}^o \subseteq \alpha \text{list} \times \alpha \text{list} \times \alpha \text{list}$

```
let rec appendo xs ys xys =  
  ((xs  $\equiv$  nil)  $\&\&$  (xys  $\equiv$  ys))  
  |||  
  (fresh (h t tys)
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\text{append} : \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list}$

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []       → ys  
  | h :: tl →  
    h :: (append tl ys)
```

$\text{append}^o \subseteq \alpha \text{list} \times \alpha \text{list} \times \alpha \text{list}$

```
let rec appendo xs ys xys =  
  ((xs  $\equiv$  nil) &&& (xys  $\equiv$  ys))  
  |||  
  (fresh (h t tys)  
   (xs  $\equiv$  h % t))
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\text{append} : \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list}$

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []       → ys  
  | h :: tl →  
    h :: (append tl ys)
```

$\text{append}^o \subseteq \alpha \text{list} \times \alpha \text{list} \times \alpha \text{list}$

```
let rec appendo xs ys xys =  
  ((xs  $\equiv$  nil) &&& (xys  $\equiv$  ys))  
  |||  
  (fresh (h t tys)  
    (xs  $\equiv$  h % t)  
    (xys  $\equiv$  h % tys))
```


Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\text{append} : \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list}$

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []       → ys  
  | h :: tl →  
    h :: (append tl ys)
```

$\text{append}^o \subseteq \alpha \text{list} \times \alpha \text{list} \times \alpha \text{list}$

```
let rec appendo xs ys xys =  
  ((xs  $\equiv$  nil) &&& (xys  $\equiv$  ys))  
  |||  
  (fresh (h t tys)  
    (xs  $\equiv$  h % t)  
    (xys  $\equiv$  h % tys)  
    (appendo t ys tys) )
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\text{append} : \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list} \rightarrow \alpha \text{list}$

```
let rec append xs ys =  
  match xs with  
  | []      → ys  
  | h :: tl →  
    h :: (append tl ys)
```

$\text{append}^o \subseteq \alpha \text{list} \times \alpha \text{list} \times \alpha \text{list}$

```
let rec appendo xs ys xys =  
  ((xs  $\equiv$  nil) &&& (xys  $\equiv$  ys))  
  |||  
  (fresh (h t tys)  
    (xs  $\equiv$  h % t)  
    (xys  $\equiv$  h % tys)  
    (appendo t ys tys) )
```

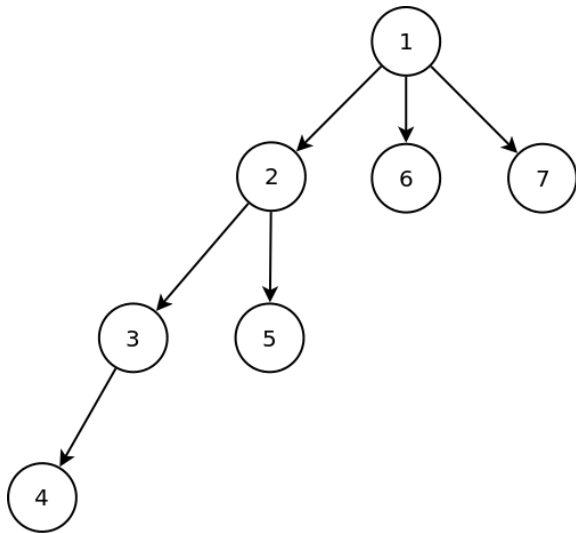
В оригинальной реализации:

```
(define (appendo xs ys xys)  
  (conde  
    [( $\equiv$  '() xs) ( $\equiv$  ys xys)]  
    [(fresh (h t tys)  
      ( $\equiv$  '(,h . ,t) xs)  
      ( $\equiv$  '(,h . ,tys) xys)  
      (appendo t ys tys))]))
```

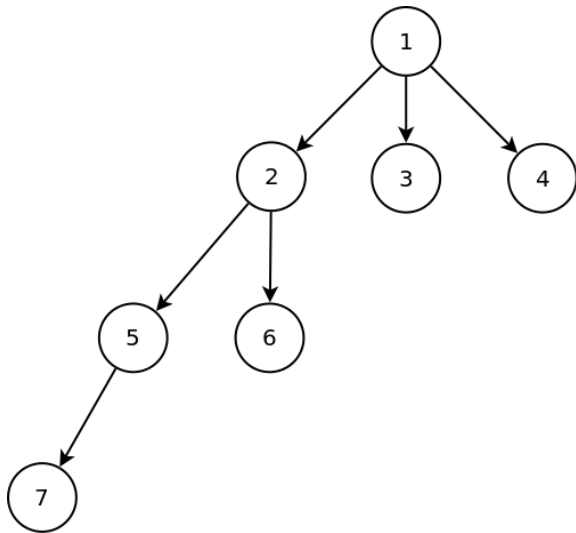
miniKanren vs. Prologs (1)

- Стратегия поиска: interleaving.

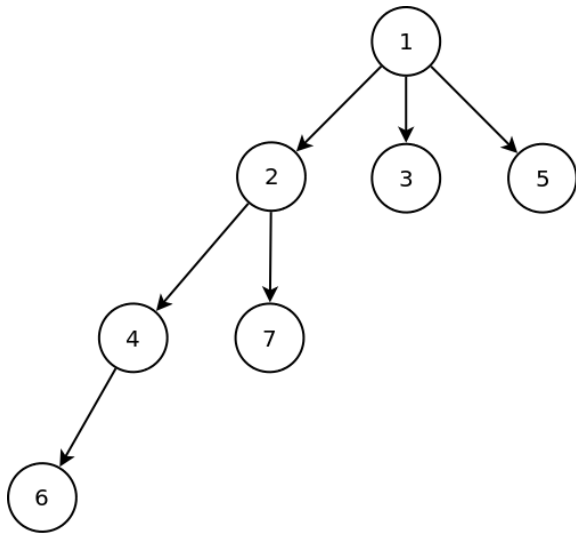
Поиск в глубину (dfs)



Поиск в ширину (bfs)



Interleaving поиск



miniKanren vs. Prologs (2)

- Стратегия поиска: interleaving search.
 - Поиск в глубину (DFS) быстрее при конечном переборе.
 - Чтобы DFS завершился в Prolog введены дополнительные синтаксические конструкции (cuts).
- miniKanren реализован как DSL – встраивается в другие языки.

Цель работы

OCanren – DSL для типобезопасного встраивания miniKanren в OCaml.

Изначальные ожидания

- Меньше ошибок при разработке.
- Сходная производительность, или даже лучше.

Предыдущие типобезопасные встраивания

- HaskellKanren 
- ukanren 
- miniKanren-ocaml 
- Molog 
- MiniKanrenT 

Предыдущие типобезопасные встраивания

- HaskellKanren 
- ukanren 
- miniKanren-ocaml 
- Molog 
- MiniKanrenT 

Различия могут быть в следующем:

- Как именно используются типы?
- Как производится унификация?

Как используются типы?

- Один заранее созданный тип, на котором унификация разрешена.
 - ✗ Нет поддержки пользовательских типов.
 - ✓ “Универсальная” функция унификации.

ukanren, miniKanren-ocaml, HaskellKanren

Как используются типы?

- Один заранее созданный тип, на котором унификация разрешена.
 - ✗ Нет поддержки пользовательских типов.
 - ✓ “Универсальная” функция унификации.

ukanren, miniKanren-ocaml, HaskellKanren

- О размещении логических переменных беспокоится пользователь.
 - ✗ Неудобно.
 - ✗ Функция унификации для каждого типа своя.
 - ✓ Поддержка произвольных типов данных.

miniKanrenT, Molog

Как сделано в OCanren?

- Один тип для разделения логических переменных от конкретных термов

type α logic = Var **of** int | Value **of** α

- который используется в пользовательских типах.

Как сделано в OCanren?

- Один тип для разделения логических переменных от конкретных термов

type α logic = Var **of** int | Value **of** α

- который используется в пользовательских типах.
- Полиморфная унификация – одна для всех типов.
 - ✗ Подход специфичен для OCaml.
 - ✗ Написано в типонебезопасном стиле...
 - ✓ ... но это скрыто от пользователя.
 - ✓ Идеологически как в первоисточнике.

Как сделано в OCanren?

- Один тип для разделения логических переменных от конкретных термов

type α logic = Var **of** int | Value **of** α

- который используется в пользовательских типах.
- Полиморфная унификация – одна для всех типов.
 - ✗ Подход специфичен для OCaml.
 - ✗ Написано в типонебезопасном стиле...
 - ✓ ... но это скрыто от пользователя.
 - ✓ Идеологически как в первоисточнике.
- Пользователь должен следовать рекомендациям по описанию типов.

Систематическое конструирование логических типов (на примере списка)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$   
...
```

Систематическое конструирование логических типов (на примере списка)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$   
...  
type ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) glist = Nil | Cons of  $\alpha$  *  $\beta$ 
```

Систематическое конструирование логических типов (на примере списка)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$   
...  
type ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) glist = Nil | Cons of  $\alpha$  *  $\beta$   
  
type  $\alpha$  list = ( $\alpha$ ,  $\alpha$  list) glist
```

Систематическое конструирование логических типов (на примере списка)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$   
...  
type ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) glist = Nil | Cons of  $\alpha$  *  $\beta$   
  
type  $\alpha$  list = ( $\alpha$ ,  $\alpha$  list) glist  
  
type  $\alpha$  llist = ( $\alpha$ ,  $\alpha$  llist) glist logic
```

Систематическое конструирование логических типов (на примере списка)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$ 
...
type ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) glist = Nil | Cons of  $\alpha$  *  $\beta$ 

type  $\alpha$  list = ( $\alpha$ ,  $\alpha$  list) glist

type  $\alpha$  llist = ( $\alpha$ ,  $\alpha$  llist) glist logic

...
# Value Nil
-:  $\alpha$  llist
# Value (Cons (Value 1), Value Nil)
-: int logic llist
# Value (Cons (Var 101), Value Nil)
-: int logic llist
```

Типобезопасность (пример)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$   
...  
val x :  $\alpha$  logic  
val s : string logic  
...  
(x  $\equiv$  s)  
...
```

Типобезопасность (пример)

```
type  $\alpha$  logic = Var of int | Value of  $\alpha$   
...  
val x :  $\alpha$  logic  
val s : string logic  
...  
(x  $\equiv$  s)  
...  
  
val n : int logic  
... (x  $\equiv$  n) ...
```

Error:

This expression has type int logic
but an expression was expected of type string logic
Type int is not compatible with type string

Промежуточные результаты

Были представлены на ML Workshop 2016 (совмещённым с ICFP 2016)

- Типобезопасное встраивание miniKanren в OCaml.
- Полиморфная унификация.
- Подход для описания типов.

Промежуточные результаты

Были представлены на ML Workshop 2016 (совмещённым с ICFP 2016)

- Типобезопасное встраивание miniKanren в OCaml.
 - Полиморфная унификация.
 - Подход для описания типов.
- ✓ Типы помогают выявить некоторые ошибки.

Промежуточные результаты

Были представлены на ML Workshop 2016 (совмещённым с ICFP 2016)

- Типобезопасное встраивание miniKanren в OCaml.
 - Полиморфная унификация.
 - Подход для описания типов.
-
- ✓ Типы помогают выявить некоторые ошибки.
 - ✗ Выигрыша в скорости нет.
 - ✗ Даже наоборот.

Дальнейшие задачи

- Найти причину замедления.
- Ускорить.
- Подход должен остаться типобезопасным.

Полиморфная унификация в OScanren

Работает для всех логических типов α^o :

$$(\equiv) : \Sigma \rightarrow \alpha^o \rightarrow \alpha^o \rightarrow \Sigma_{\perp}$$

Полиморфная унификация в OScanren

Работает для всех логических типов α^o :

$$(\equiv) : \Sigma \rightarrow \alpha^o \rightarrow \alpha^o \rightarrow \Sigma_{\perp}$$

Стандартный алгоритм с треугольной подстановкой и occurs check, использующий типонебезопасный интерфейс `Obj`.

Полиморфная унификация в OSanren

Работает для всех логических типов α^o :

$$(\equiv) : \Sigma \rightarrow \alpha^o \rightarrow \alpha^o \rightarrow \Sigma_{\perp}$$

Стандартный алгоритм с треугольной подстановкой и occurs check, использующий типонебезопасный интерфейс `Obj`.

Тонкости:

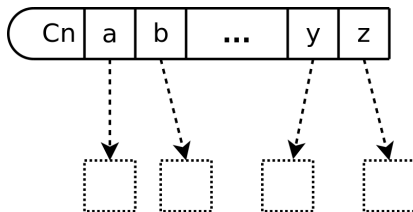
- Типонебезопасный стиль – компилятор теряет информацию о типах.
- Дополнительная стадия восстановления типов (refinement).

Алгебраические типы данных в памяти

```
type ( $\alpha, \beta, \dots$ ) typ =  
|  $C_1$  of  $t_{11}$  * ... *  $t_{1m}$   
| ...  
|  $C_n$  of  $t_{n1}$  * ... *  $t_{nm}$ 
```

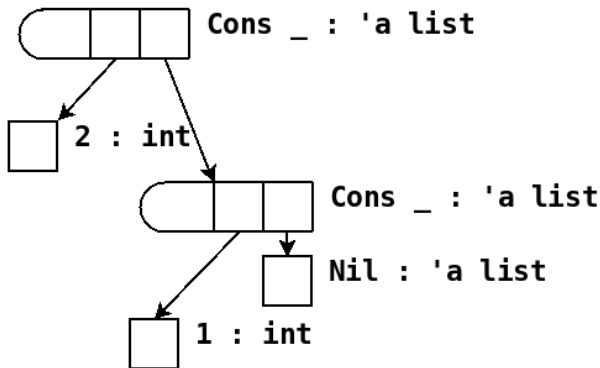
Алгебраические типы данных в памяти

type (α, β, \dots) typ =
| C_1 **of** $t_{11} * \dots * t_{1m}$
| \dots
| C_n **of** $t_{n1} * \dots * t_{nm}$



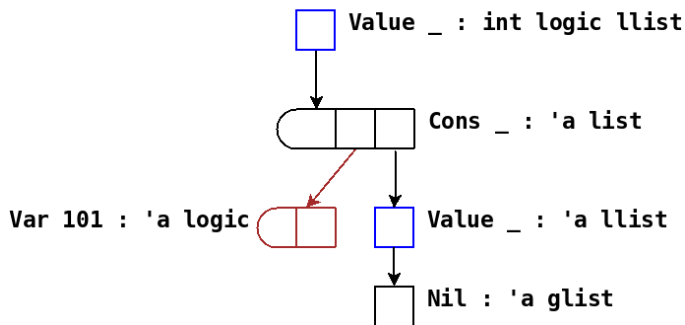
Представление термов в памяти (пример для списка)

Cons (2, Cons (1, Nil)) : int list



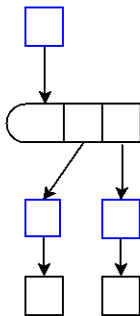
Тегированное представление логических значений

**Value (Cons (Var 101, Value Nil))
: int llist**

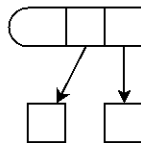


Рост размера термов из-за тегирования

Value (Cons (Value 2, Value Nil)) : int llist



Cons (2, Nil) : int list

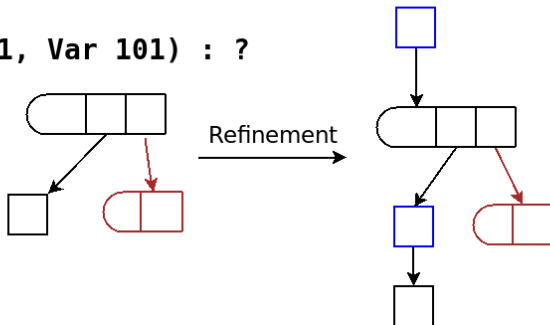


Основная идея

- Унифицировать нетипизируемые термы.
- Преобразовывать к типизируемому представлению в самом конце (стадия refinement).
- Запоминать формальные типы значений при каждом преобразовании к логическому значению.

Value (Cons (Value 1, Var 101)) : int llist

Cons (1, Var 101) : ?



План улучшения реализации

- Новое представление деревьев
 - Значению нельзя присвоить конкретный тип.
 - Нужен абстрактный тип значений.
 - Предоставить интерфейс для конструирования логических значений.
 - Преобразование абстрактного логического значения в типизируемое (во время `refinement`).
- Модернизировать подход по описанию типов логических значений.
- Не потерять типовую безопасность.

Тип injected

type (α , β) injected

Тип α — это исходный тип, а тип β — его логическое представление

Конструирование логических значений для простых типов

type (α, β) injected

val lift: $\alpha \rightarrow (\alpha, \alpha)$ injected

val inj : (α, β) injected $\rightarrow (\alpha, \beta \text{ logic})$ injected

Конструирование логических значений для простых типов

```
type ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected
```

```
val lift:  $\alpha \rightarrow (\alpha, \alpha)$  injected
```

```
val inj : ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected  $\rightarrow (\alpha$ ,  $\beta$  logic) injected
```

Например, для чисел:

```
# inj (lift 5)
```

```
-: (int, int logic) injected
```


Конструирование логических значений для простых типов

```
type ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected
```

```
val lift:  $\alpha \rightarrow (\alpha, \alpha)$  injected
```

```
val inj : ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected  $\rightarrow (\alpha$ ,  $\beta$  logic) injected
```

Например, для чисел:

```
# inj (lift 5)
```

```
-: (int, int logic) injected
```

Оба введенных примитива оставляют переданное значение как есть (identity)

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct  
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$   
  let fmap = ...  
end
```

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct  
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$   
  let fmap = ...  
end  
  
# Make1(Option).distrib  
...
```

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct  
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$   
  let fmap = ...  
end  
  
# Make1(Option).distrib  
...  
# let some x = inj (distrib (Some x))  
-: ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected  $\rightarrow$  ( $\alpha$  option,  $\beta$  option logic) injected
```

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$ 
  let fmap = ...
end

# Make1(Option).distrib
...
# let some x = inj (distrib (Some x))
-: ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected  $\rightarrow$  ( $\alpha$  option,  $\beta$  option logic) injected
```

Примитив **distrib**, который позволяет конструировать из значений типа **(_, _) injected** другие значения типа **(_, _) injected**.

Он ничего не делает со значением (identity).

Восстановление посчитанных значений (refinement)

Необходимо, так как значения в типе (α, β) `injected` хранятся в нетипизированном виде.

```
module Option = struct  
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$   
  let fmap = ...  
end
```

Восстановление посчитанных значений (refinement)

Необходимо, так как значения в типе (α, β) `injected` хранятся в нетипизированном виде.

```
module Option = struct  
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$   
  let fmap = ...  
end  
  
# Make1(Option).reify  
:  $((\alpha, \beta) \text{ injected} \rightarrow \beta) \rightarrow$ 
```


Восстановление посчитанных значений (refinement)

Необходимо, так как значения в типе (α, β) `injected` хранятся в нетипизированном виде.

```
module Option = struct  
  type  $\alpha$  option = None | Some of  $\alpha$   
  let fmap = ...  
end  
  
# Make1(Option).reify  
: (( $\alpha$ ,  $\beta$ ) injected  $\rightarrow$   $\beta$ )  $\rightarrow$   
  ( $\alpha$  option,  $\beta$  option logic) injected  $\rightarrow$   
   $\beta$  option logic
```

При построении `reify` функция `fmap` используется по существу.

Итоговые результаты

- Типобезопасная реализация.
- С поддержкой неравенств термов (disequality constraints) и occurs check.
- Сравнима по скорости с faster-miniKanren .
- Типы выявляют простые ошибки.
- Типобезопасность могут заменить некоторые проверки во время выполнения (abstento, numero, simbolo)...
- ... сокращая количество примитивов с 8 до 5 (\equiv , \neq , конъюнкция, дизъюнкция, fresh).

Репозиторий 