

Синтаксический анализ

Лекция 7

Майоров Владимир Дмитриевич

22 октября 2025

Синтаксис

- Предложение – это единица языка, которая представляет собой грамматически организованное соединение слов, обладающее смысловой законченностью.
- Грамматика – раздел лингвистики, который изучает закономерности построения правильных осмысленных речевых отрезков (словоформ, словосочетаний, предложений, текстов).
- Синтаксис — раздел лингвистики, изучающий и моделирующий правила, по которым образуются единицы, более крупные, чем слово, а именно словосочетания и предложения.

Синтаксические правила

- Существительное сочетается с прилагательным

быстрый бег → быстрый бег

быстро бег → не словосочетание

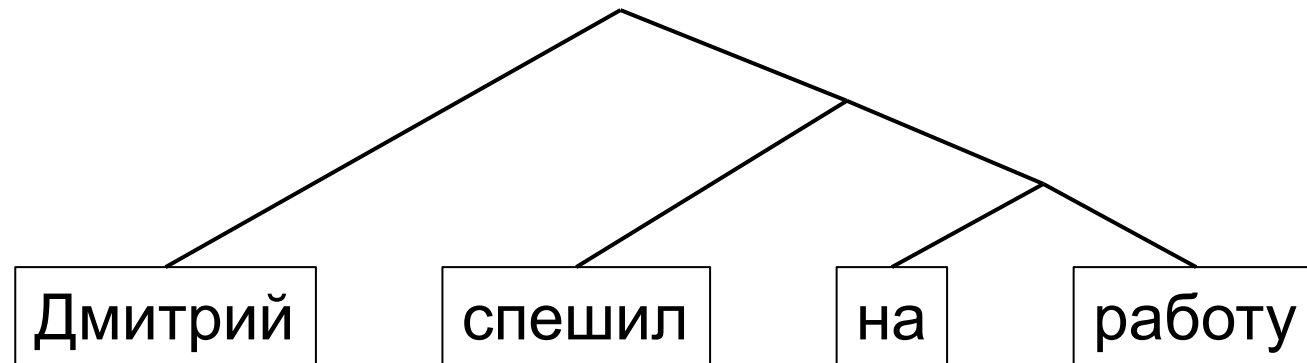
- Глагол сочетается с наречием

бегать быстрый → не словосочетание

бегать быстро → бегать быстро

Синтаксическая структура

- Представление предложения в виде вложенных составляющих.
- Составляющая (фраза, синтаксическая группа) – структурная единица предложения, составленная из более тесно связанных друг с другом составляющих меньшего размера.



Синтаксические правила

- Существительное управляет прилагательным

красная книга → красная книга

красный книга → не словосочетание

- Предлог управляет существительным

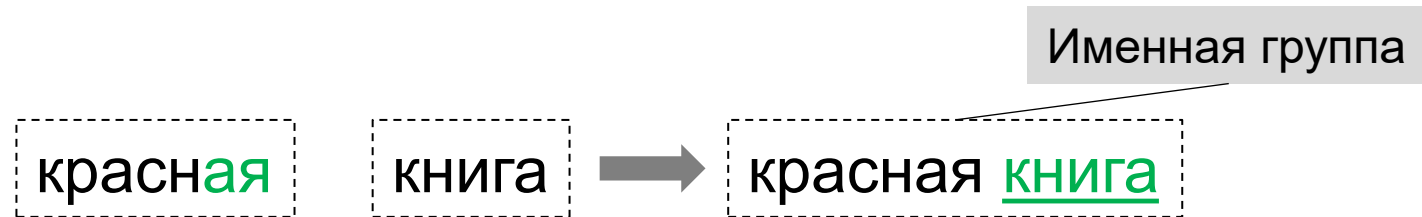
в книга → не словосочетание

в книге → в книге

Синтаксические правила

В зависимости от главного слова в словосочетании выделяют

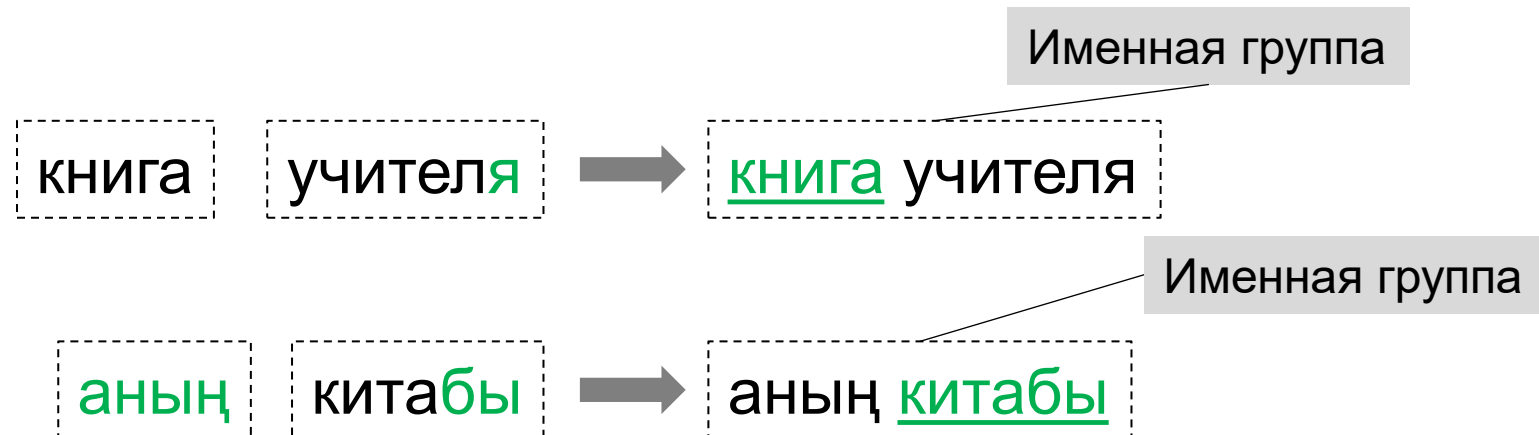
- Именные группы (главное – существительное)
- Группа прилагательного
- Наречная группа
- Предложная группа
- Глагольная группа
- Предложение



Синтаксические правила

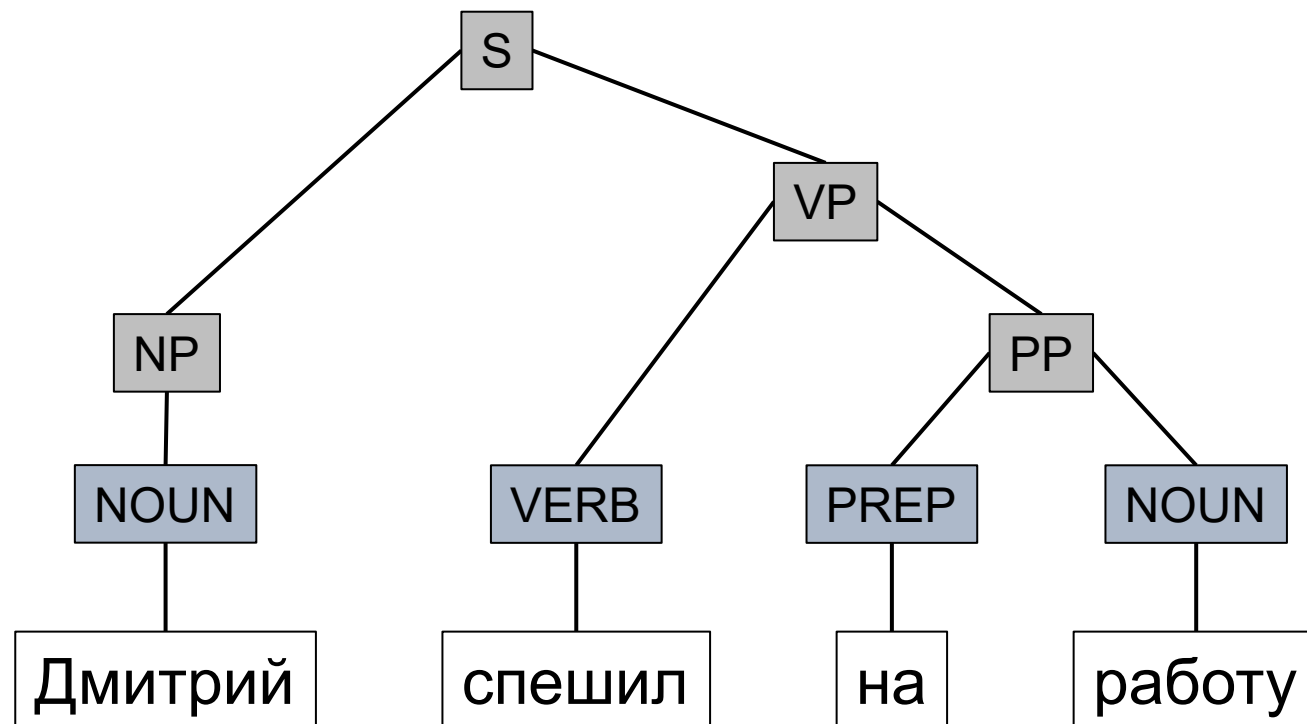
В зависимости от главного слова в словосочетании выделяют

- Именные группы (главное – существительное)
- Группа прилагательного
- Наречная группа
- Предложная группа
- Глагольная группа
- Предложение



Синтаксическая структура

- Каждой составляющей назначается тип в зависимости от главного слова



Формальная грамматика

- Способ описания формального языка.
- Формальная грамматика состоит из:
 - Σ — множество терминальных символов
 - N — множество нетерминальных символов
 - P — набор правил вывода $\alpha \rightarrow \beta$, где
 - α — последовательность символов из $\Sigma \cup N$, хотя бы один из N
 - β — последовательность символов из $\Sigma \cup N$
 - S — начальный символ (из N)

Формальная грамматика

- P – набор правил вывода $\alpha \rightarrow \beta$, где
 - α – последовательность символов из $\Sigma \cup N$, хотя бы один из N
 - β – последовательность символов из $\Sigma \cup N$
- Иерархия Хомского
 - тип 0. неограниченные грамматики
любые правила
 - тип 1. контекстно-зависимые грамматики
правила вида $c_1 A c_2 \rightarrow c_1 \beta c_2$
 - тип 2. контекстно-свободные грамматики
правила вида $A \rightarrow \beta$
 - тип 3. регулярные грамматики
правила вида $A \rightarrow a$, $A \rightarrow aB$ или $A \rightarrow \varepsilon$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

S

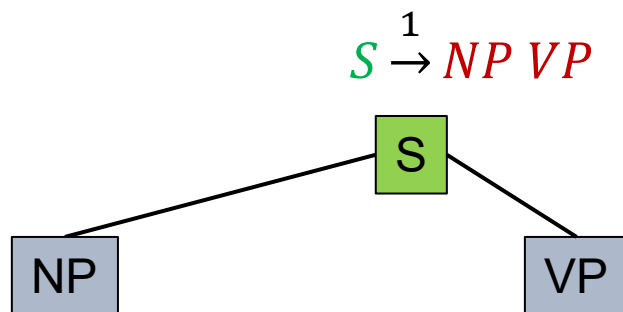
S

1. *S* → *NP VP*
2. *VP* → *Verb NP*
3. *VP* → *Verb NP PP*
4. *NP* → *Pro*
5. *NP* → *Det NP*
6. *NP* → *Noun PP*
7. *NP* → *Noun*
8. *PP* → *Prep Noun*
9. *Verb* → *booked*
10. *Noun* → *flight*
11. *Noun* → *Moscow*
12. *Pro* → *I*
13. *Det* → *a*
14. *Det* → *the*
15. *Prep* → *from*

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

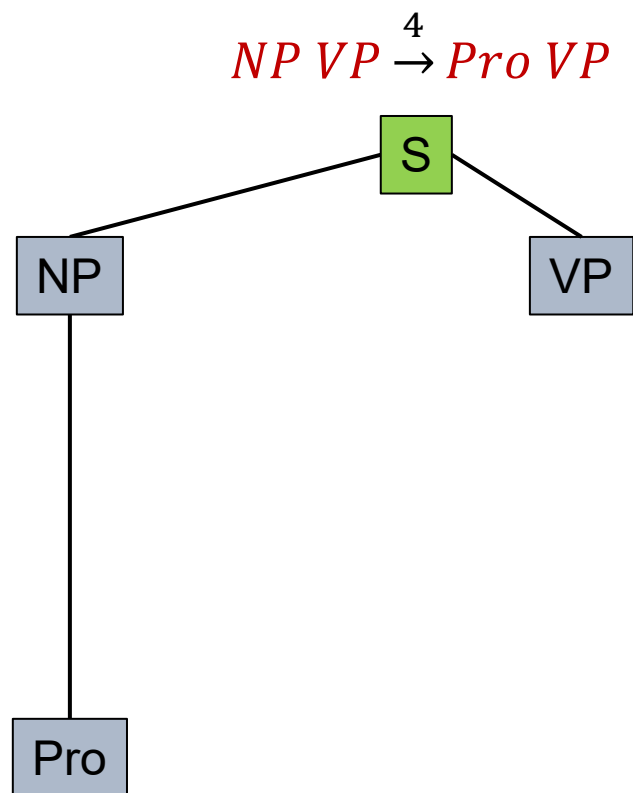


1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

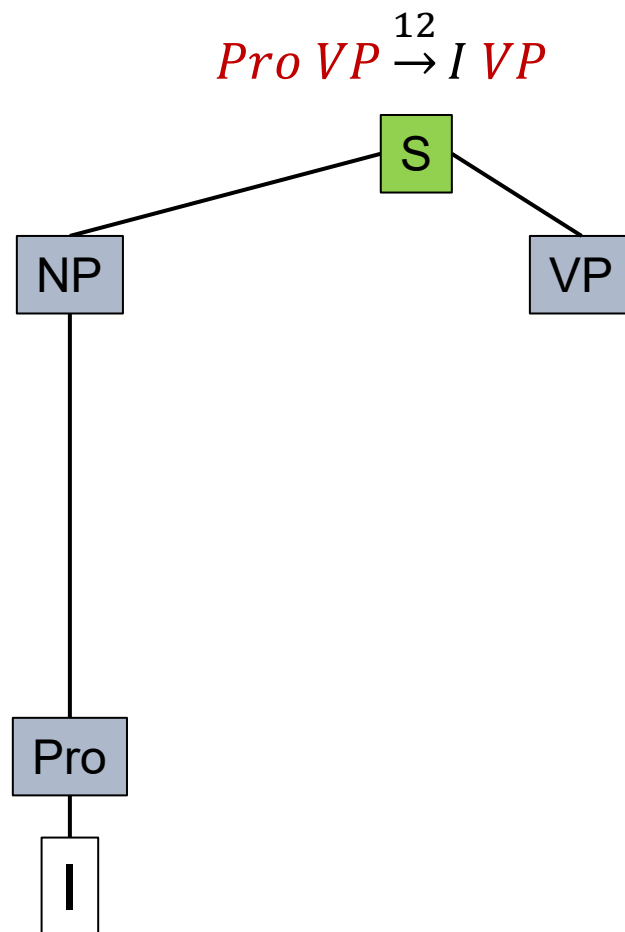


1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

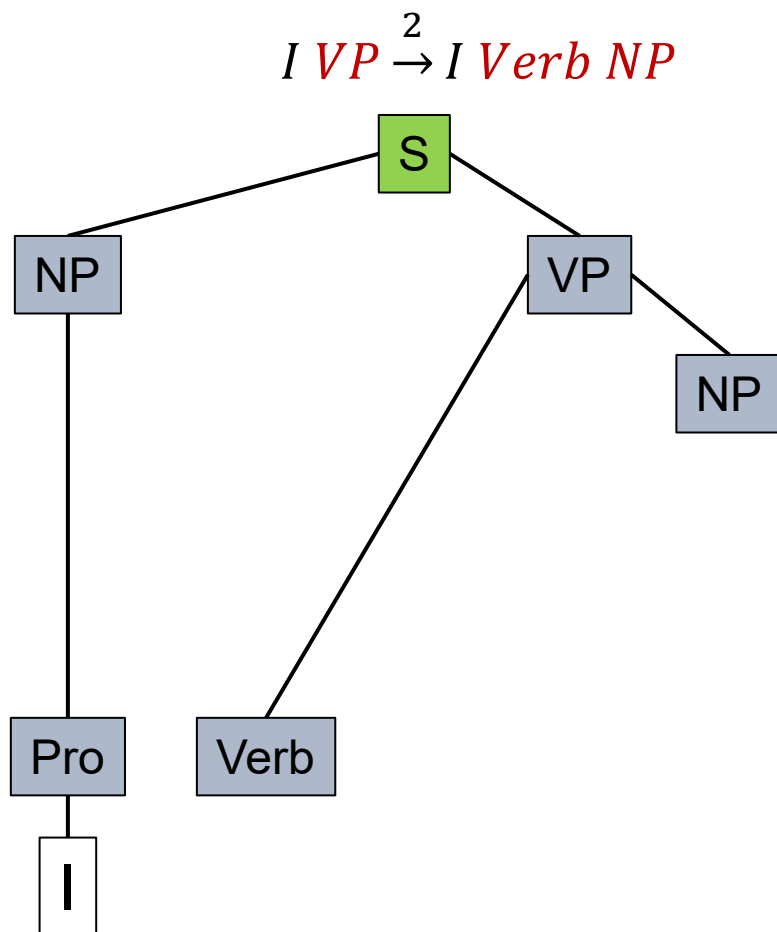


1. $S \rightarrow NP\ VP$
2. $VP \rightarrow Verb\ NP$
3. $VP \rightarrow Verb\ NP\ PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det\ NP$
6. $NP \rightarrow Noun\ PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep\ Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$



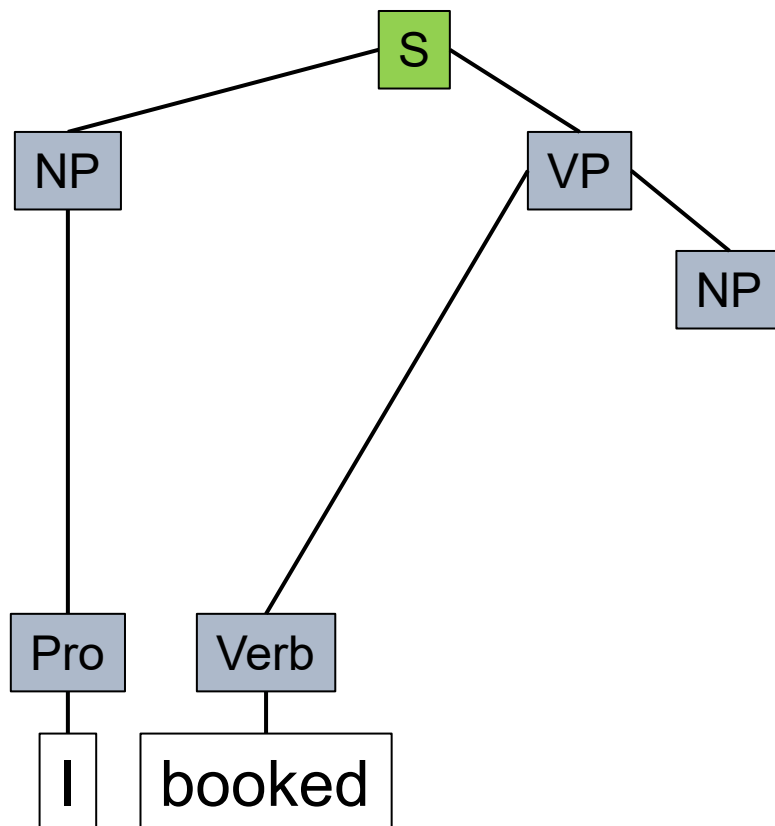
1. $S \rightarrow NP \ VP$
2. $VP \rightarrow Verb \ NP$
3. $VP \rightarrow Verb \ NP \ PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det \ NP$
6. $NP \rightarrow Noun \ PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep \ Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

$I \text{ Verb } NP \xrightarrow{9} I \text{ booked } NP$



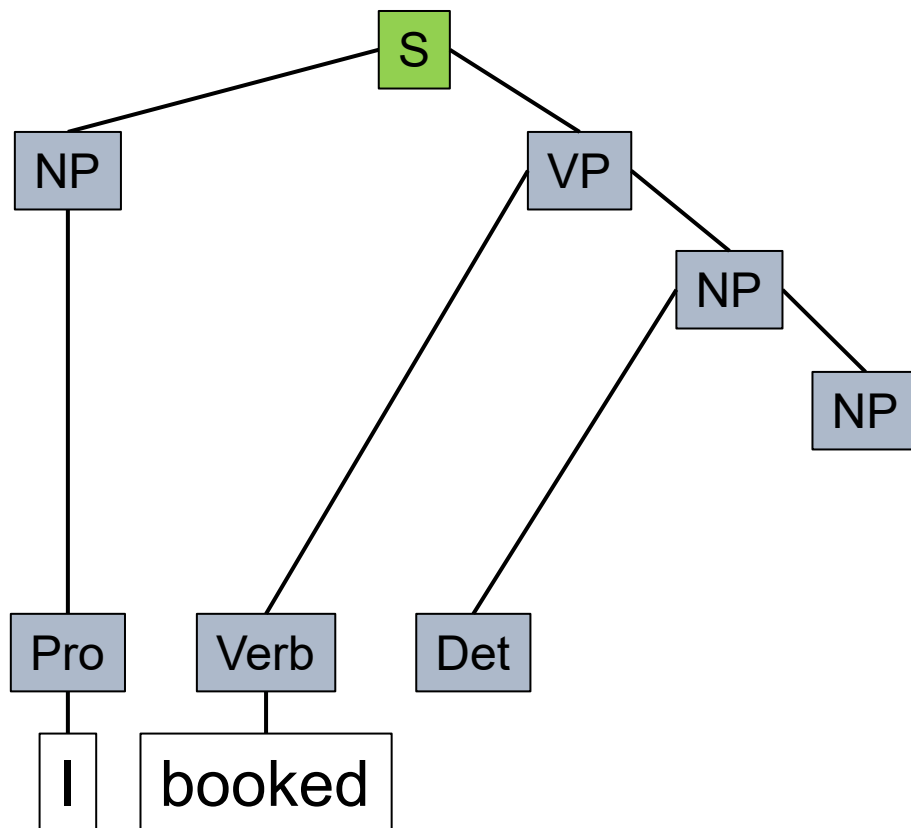
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $\underline{Verb} \rightarrow \underline{booked}$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

$I \text{ booked } NP \xrightarrow{5} I \text{ booked } Det \ NP$



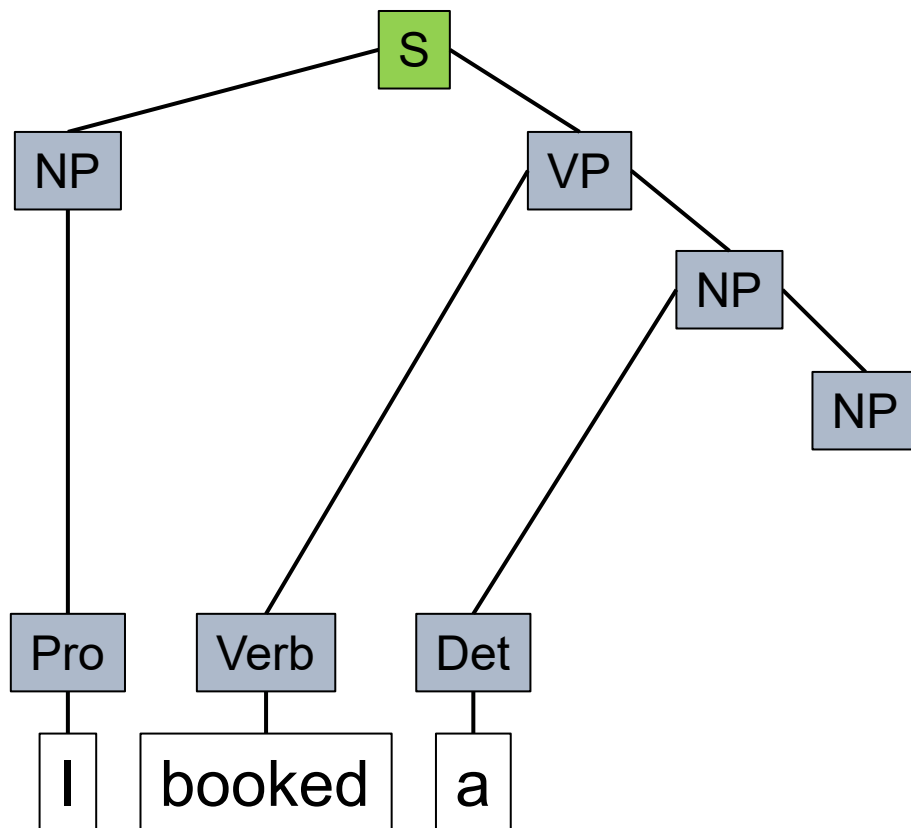
1. $S \rightarrow NP \ VP$
2. $VP \rightarrow Verb \ NP$
3. $VP \rightarrow Verb \ NP \ PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det \ NP$
6. $NP \rightarrow Noun \ PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep \ Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

$I \text{ booked } Det \text{ } NP \xrightarrow{13} I \text{ booked } a \text{ } NP$



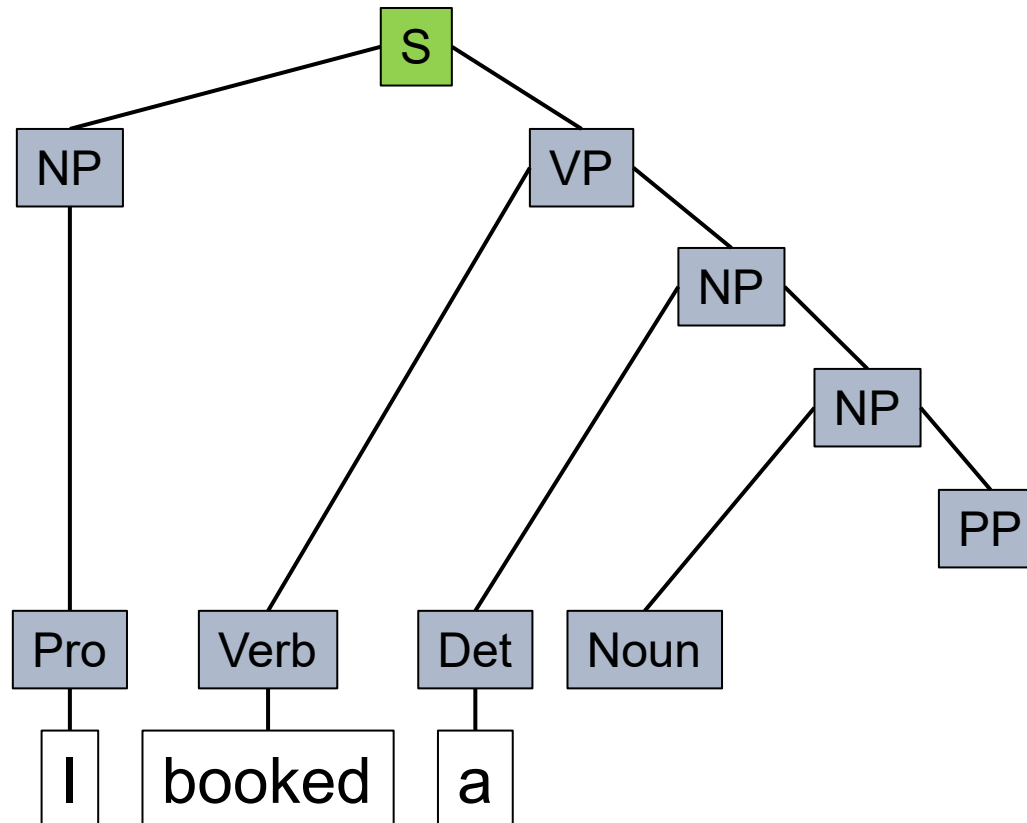
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

$I \text{ booked } a \text{ } NP \xrightarrow{6} I \text{ booked } a \text{ } Noun \text{ } PP$



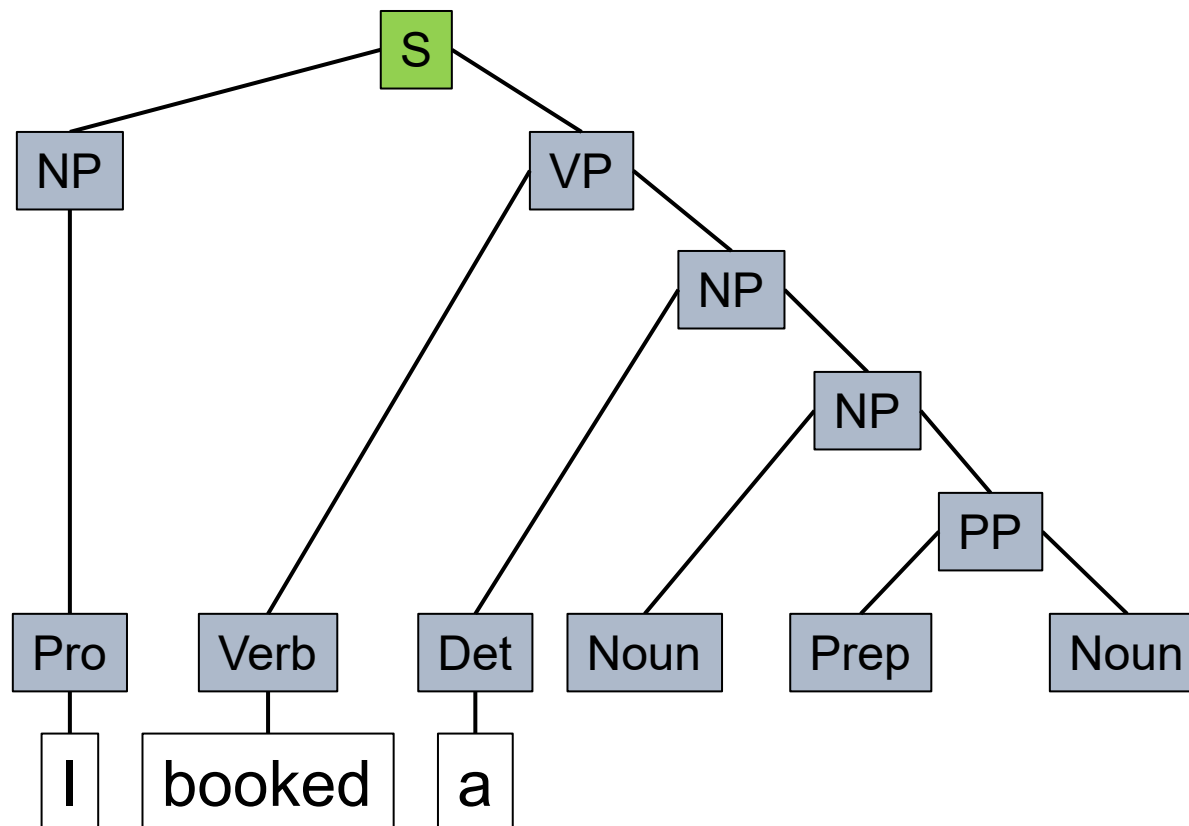
1. $S \rightarrow NP \ VP$
2. $VP \rightarrow Verb \ NP$
3. $VP \rightarrow Verb \ NP \ PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det \ NP$
6. $NP \rightarrow Noun \ PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep \ Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

I booked a Noun PP ⁸ $\rightarrow$ *I booked a Noun Prep Noun*



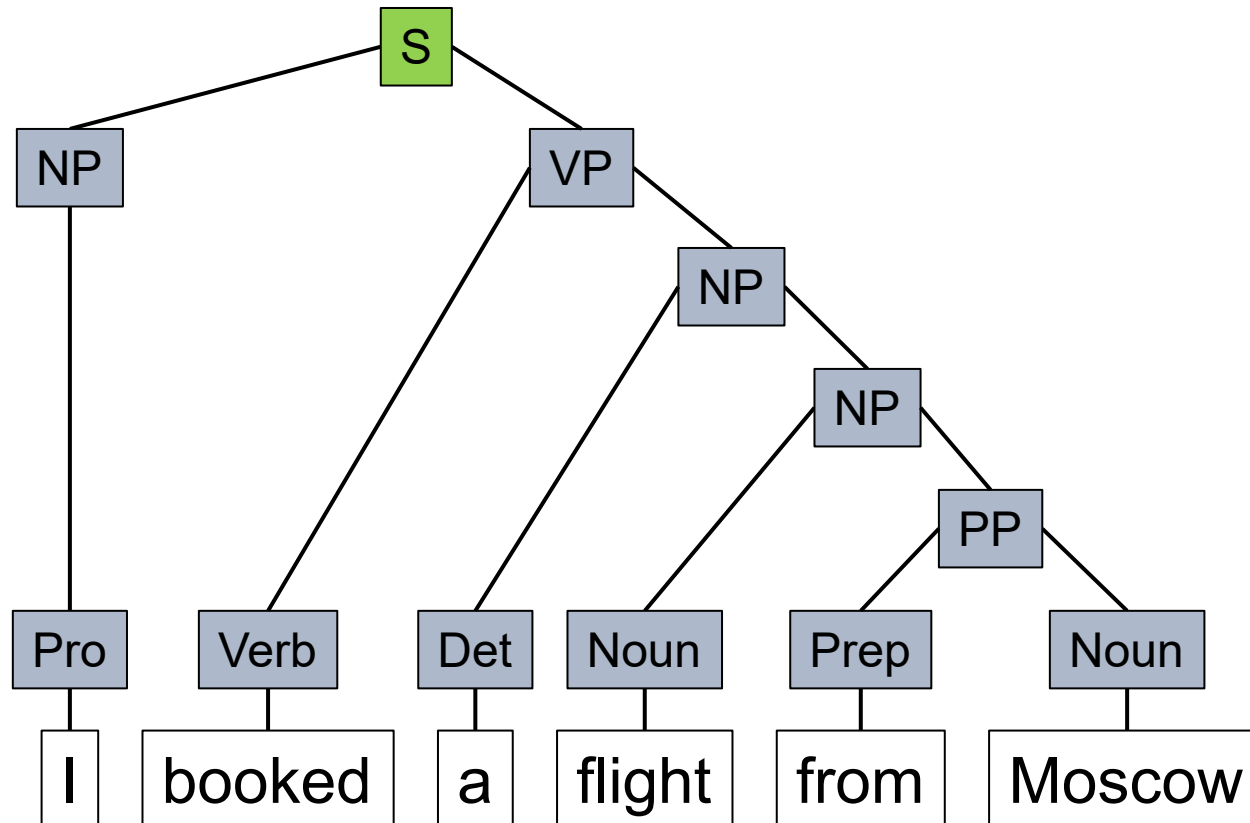
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

Формальная грамматика

$\Sigma = \{booked, flight, Moscow, I, a, from\}$

$N = \{S, VP, NP, PP, Verb, Noun, Pro, Det, Prep\}$

I booked a Noun Prep Noun^{10 15 11} → → I booked a flight from Moscow



1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow \underline{flight}$
11. $Noun \rightarrow \underline{Moscow}$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow \underline{from}$

Построение грамматики

(S
 (NP
 (Pro I))
 (VP
 (Verb booked)
 (NP
 (Det a)
 (NP
 (Noun flight)
 (PP
 (Prep from)
 (Noun Moscow))))))

Построение грамматики

(**S**
 (**NP**
 (Pro I))
 (**VP**
 (Verb booked)
 (**NP**
 (Det a)
 (**NP**
 (Noun flight)
 (**PP**
 (Prep from)
 (Noun Moscow))))))

1. $S \rightarrow NP VP$

Построение грамматики

(S
 (NP
 (Pro I))
 (VP
 (Verb booked)
 (NP
 (Det a)
 (NP
 (Noun flight)
 (PP
 (Prep from)
 (Noun Moscow))))))

1. $S \rightarrow NP VP$
2. $NP \rightarrow Pro$

Построение грамматики

(S
 (NP
 (Pro I)
 (VP
 (Verb booked)
 (NP
 (Det a)
 (NP
 (Noun flight)
 (PP
 (Prep from)
 (Noun Moscow))))))

1. $S \rightarrow NP VP$
2. $NP \rightarrow Pro$
3. $Pro \rightarrow I$

Построение грамматики

(S
 (NP
 (Pro I))
 (VP
 (Verb booked)
 (NP
 (Det a)
 (NP
 (Noun flight)
 (PP
 (Prep from)
 (Noun Moscow))))))

1. $S \rightarrow NP VP$
2. $NP \rightarrow Pro$
3. $Pro \rightarrow I$
4. $VP \rightarrow Verb NP$

Разбор предложения

- На входе: последовательность символов из Σ (слова)
- На выходе:
 - Синтаксическое дерево
 - Последовательность правил для генерации входной строки
- Методы построения дерева:
 - Сверху-вниз
Из начального символа S , вывести входную строку
 - Снизу-вверх
Из входной строки вывести начальный символ S

Алгоритм СҮК

- Для работы необходима КС грамматика в нормальной форме Хомского (CNF)
 - Все правила должны иметь вид: $A \rightarrow BC$ или $A \rightarrow \beta$
 - Любая КС грамматика может быть преобразована в CNF (кроме правила $S \rightarrow \varepsilon$)
- Алгоритм позволяет определить выводимо ли предложение в заданной КС грамматике
- При небольшой модификации алгоритм строит все возможные разборы предложения

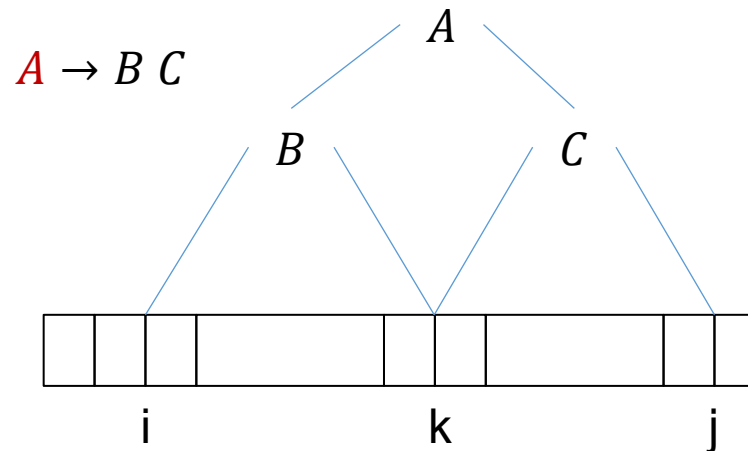
Алгоритм CYK

1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb NP PP$
4. $NP \rightarrow Pro$
5. $NP \rightarrow Det NP$
6. $NP \rightarrow Noun PP$
7. $NP \rightarrow Noun$
8. $PP \rightarrow Prep Noun$
9. $Verb \rightarrow booked$
10. $Noun \rightarrow flight$
11. $Noun \rightarrow Moscow$
12. $Pro \rightarrow I$
13. $Det \rightarrow a$
14. $Det \rightarrow the$
15. $Prep \rightarrow from$

1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК

- Идея алгоритма заключается в рассмотрении всех подстрок исходной строки
 - Для каждой подстроки определить, можно ли вывести ее в заданной грамматике, зная какие подстроки меньшего размера можно вывести в этой грамматике



Алгоритм СҮК

6						
5						
4						
3						
2						
1	<i>NP</i> <i>Pro</i>	<i>Verb</i>	<i>Det</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>	<i>Prep</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>
	I	booked	a	flight	from	Moscow

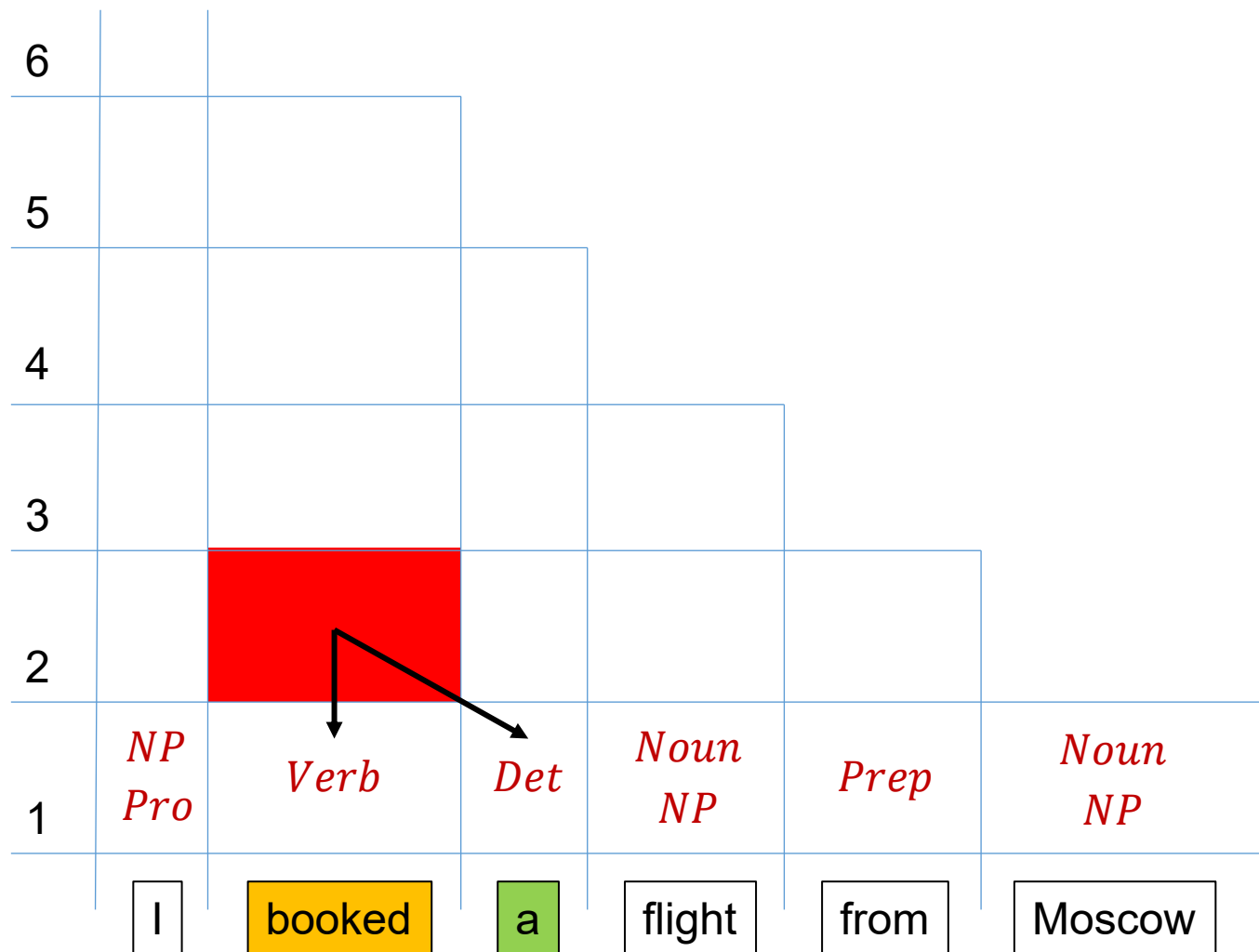
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК

6						
5						
4						
3						
2						
1	<i>NP</i> <i>Pro</i>	<i>Verb</i>	<i>Det</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>	<i>Prep</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>
	I	booked	a	flight	from	Moscow

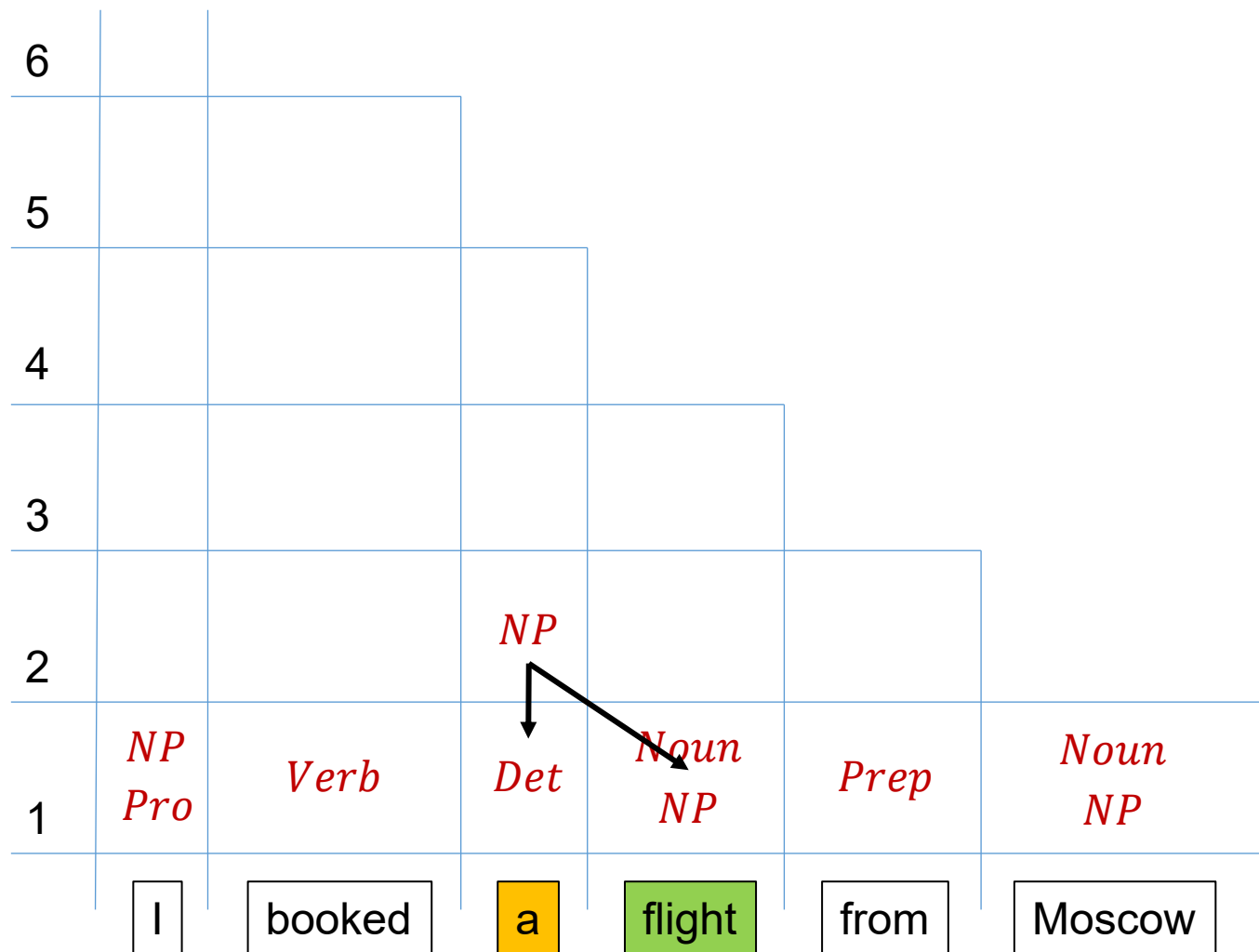
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СΥΚ



1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СΥΚ

6						
5						
4						
3						
2			NP			
1	NP Pro	Verb	Det	Noun NP	Prep	Noun NP
	I	booked	a	flight	from	Moscow

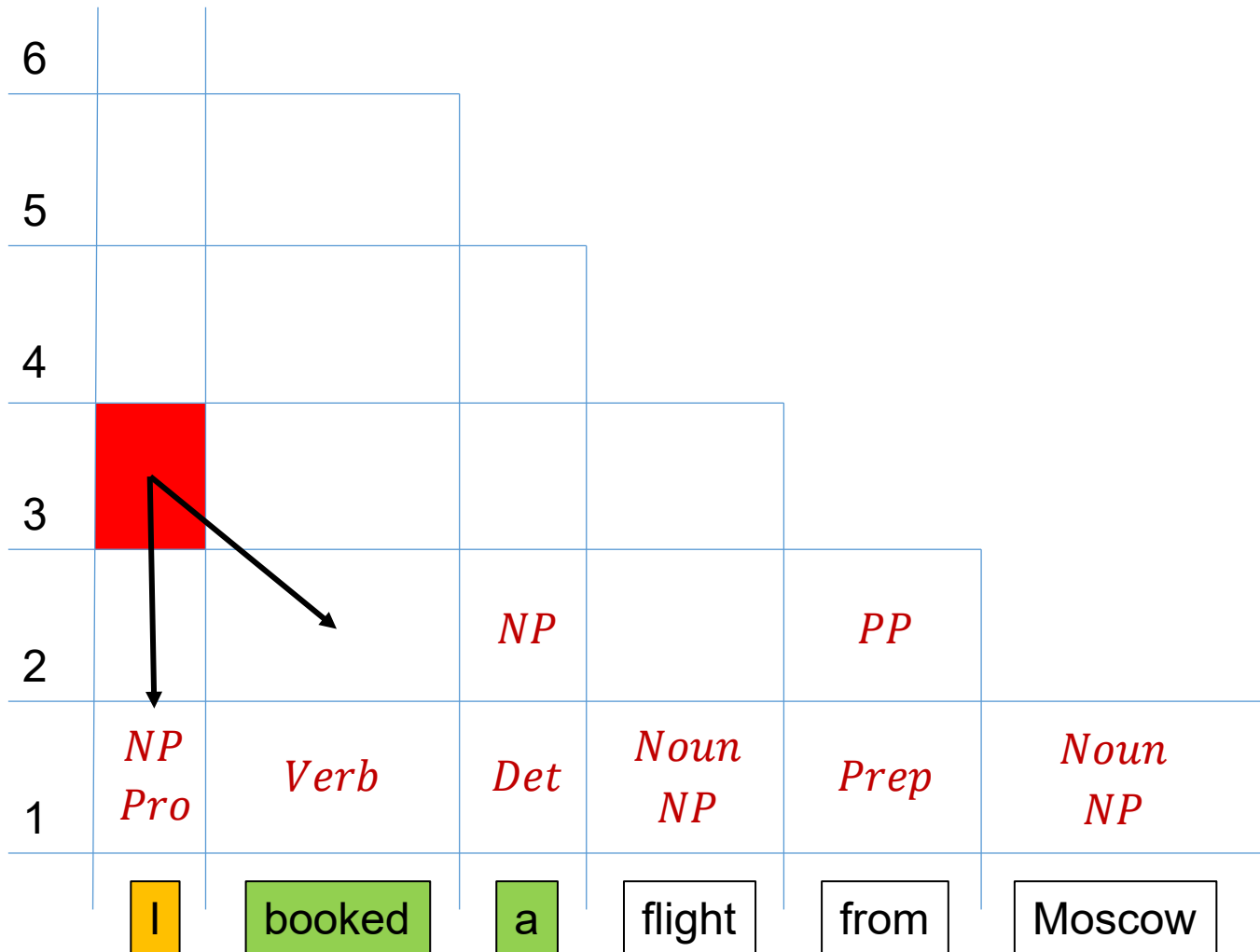
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК

6						
5						
4						
3						
2			<i>NP</i>		<i>PP</i>	
1	<i>NP</i> <i>Pro</i>	<i>Verb</i>	<i>Det</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>	<i>Prep</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>
	I	booked	a	flight	from	Moscow

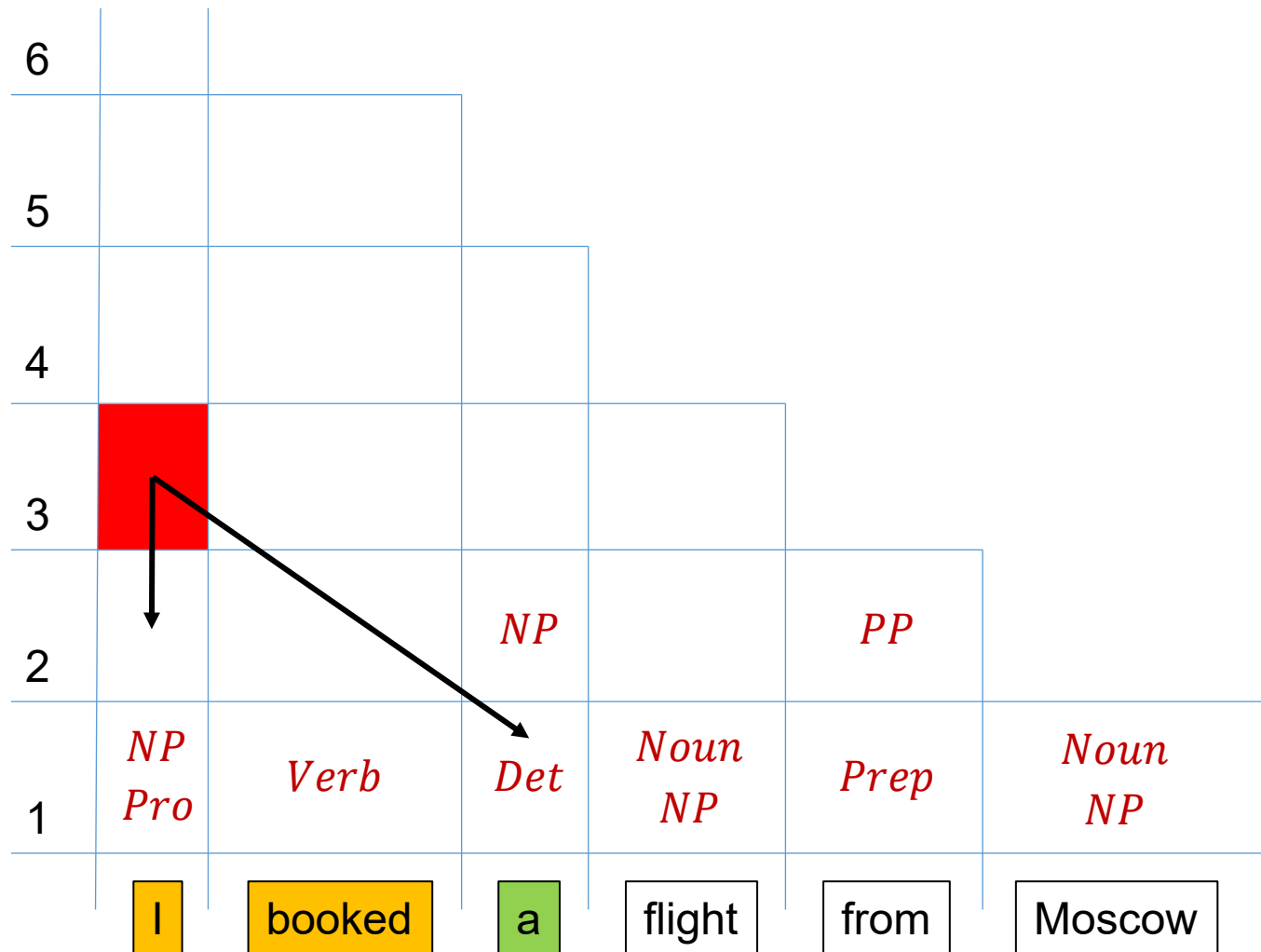
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



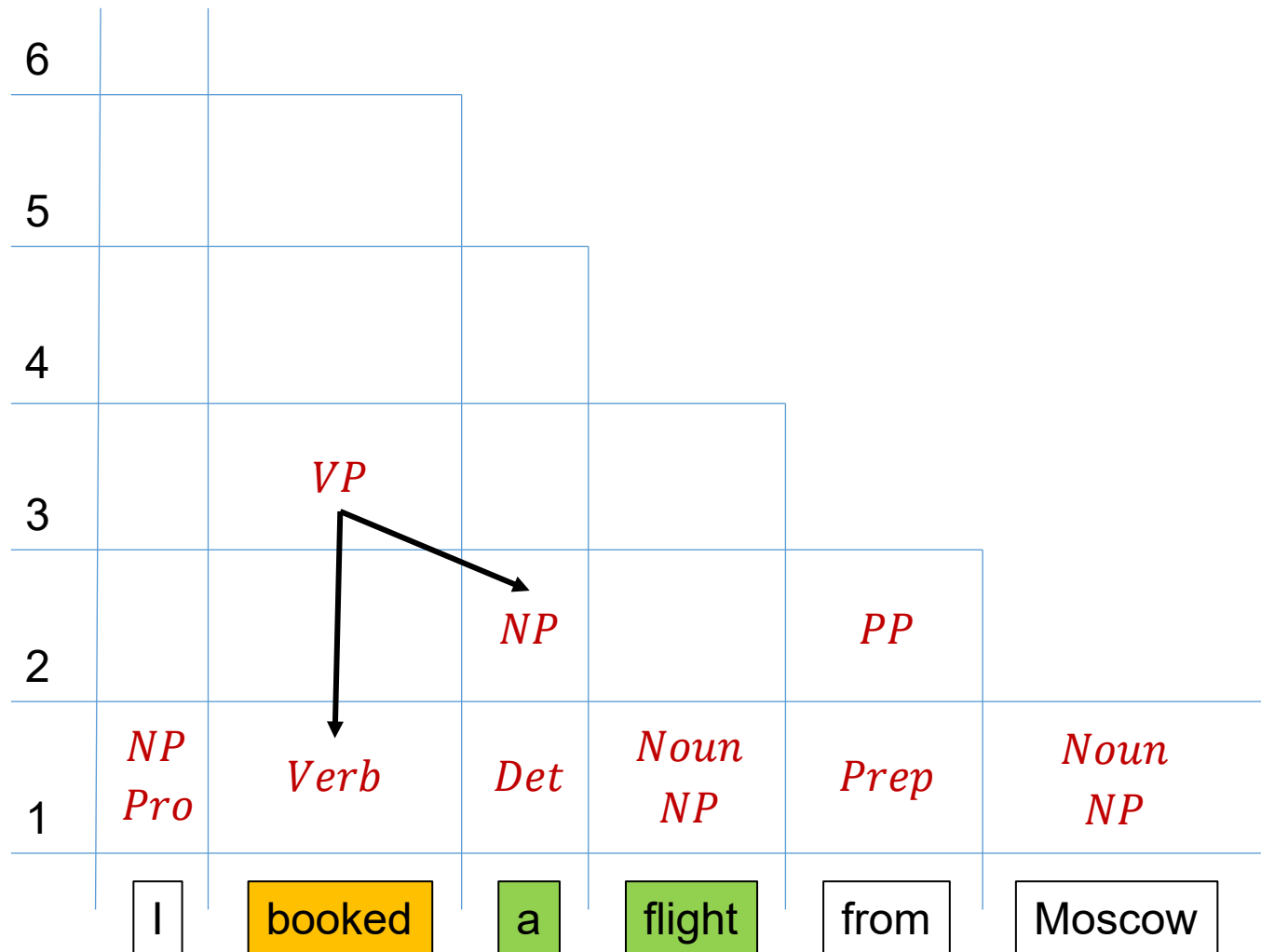
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СΥΚ



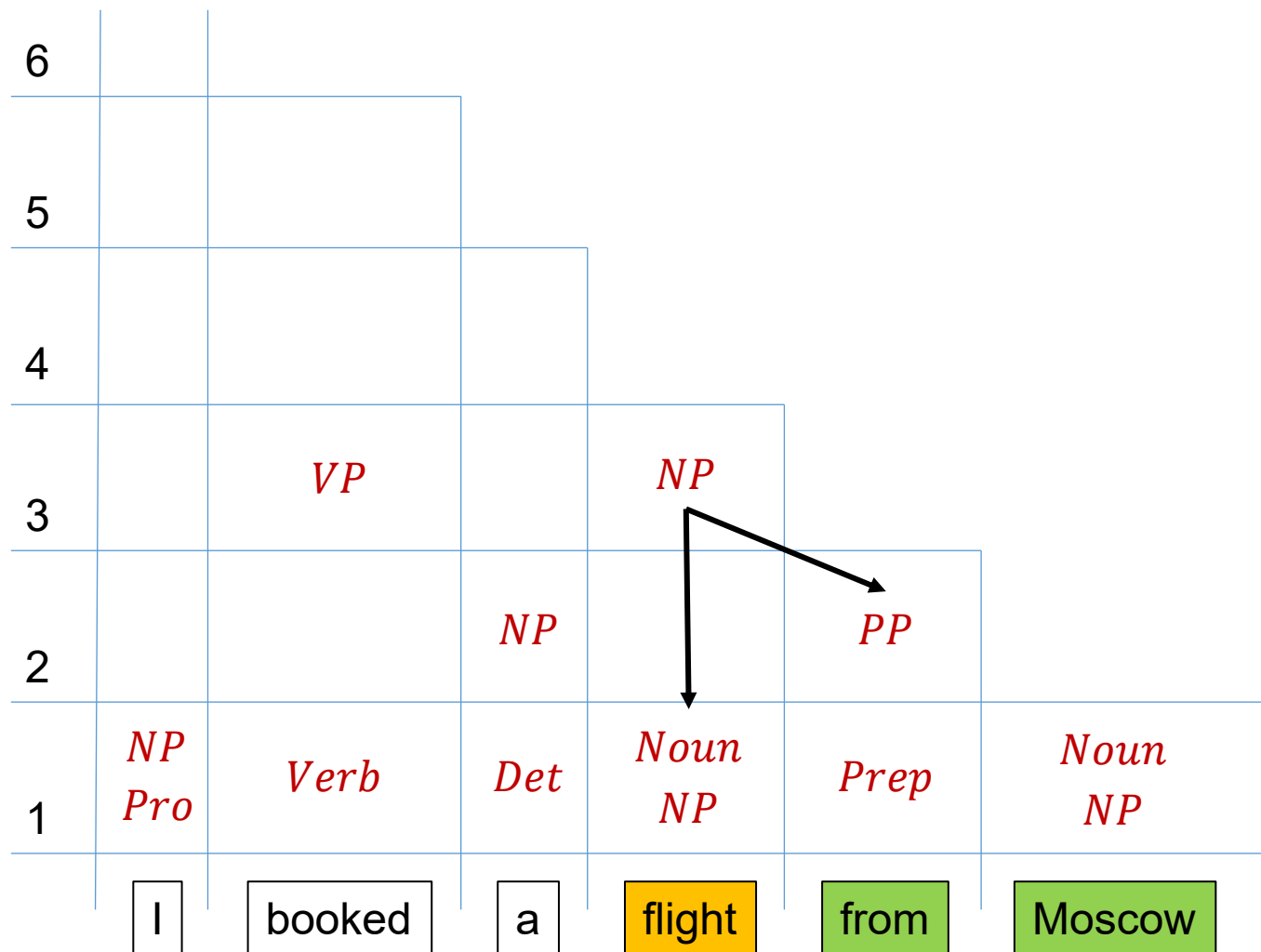
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СΥΚ



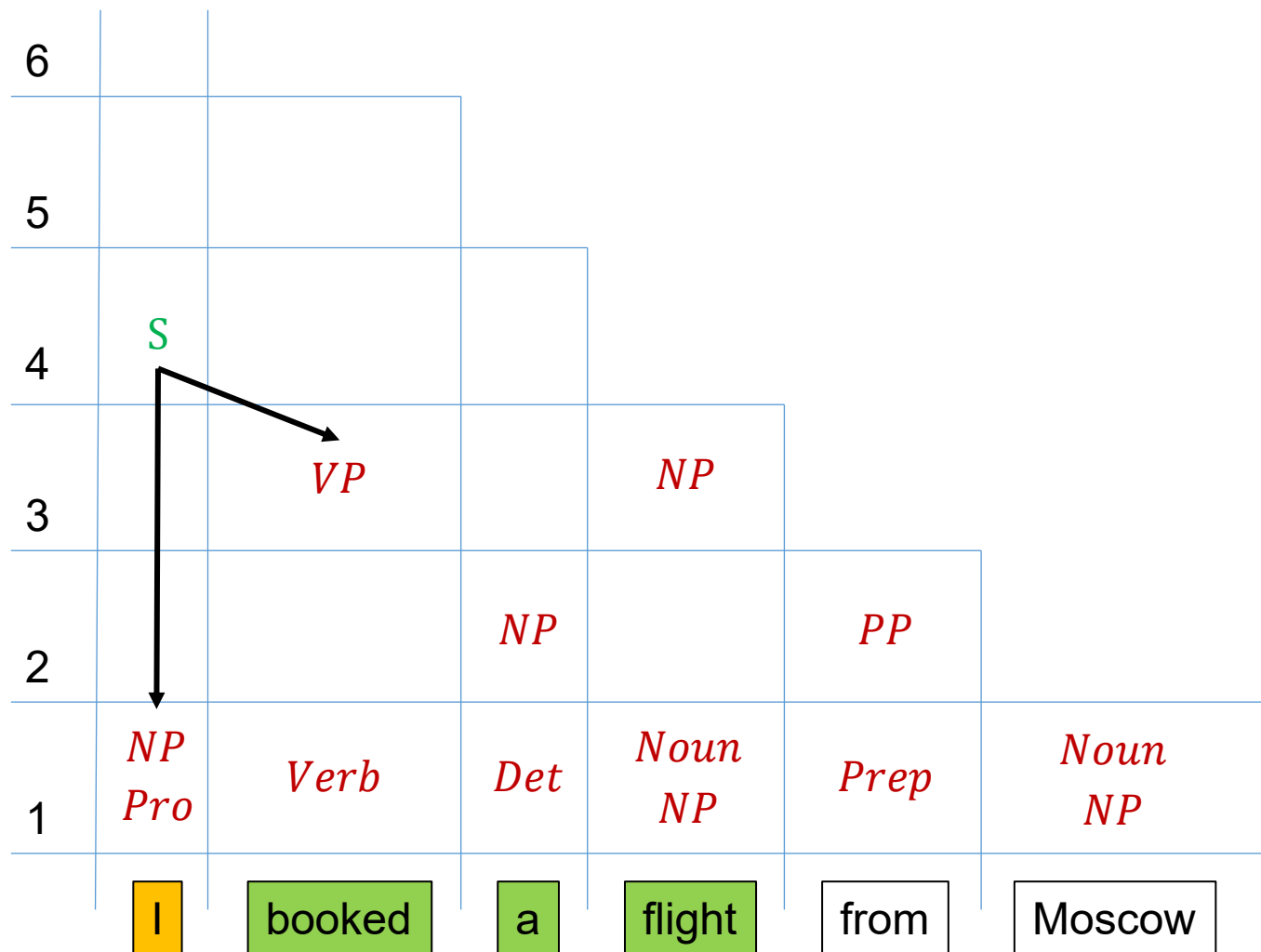
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



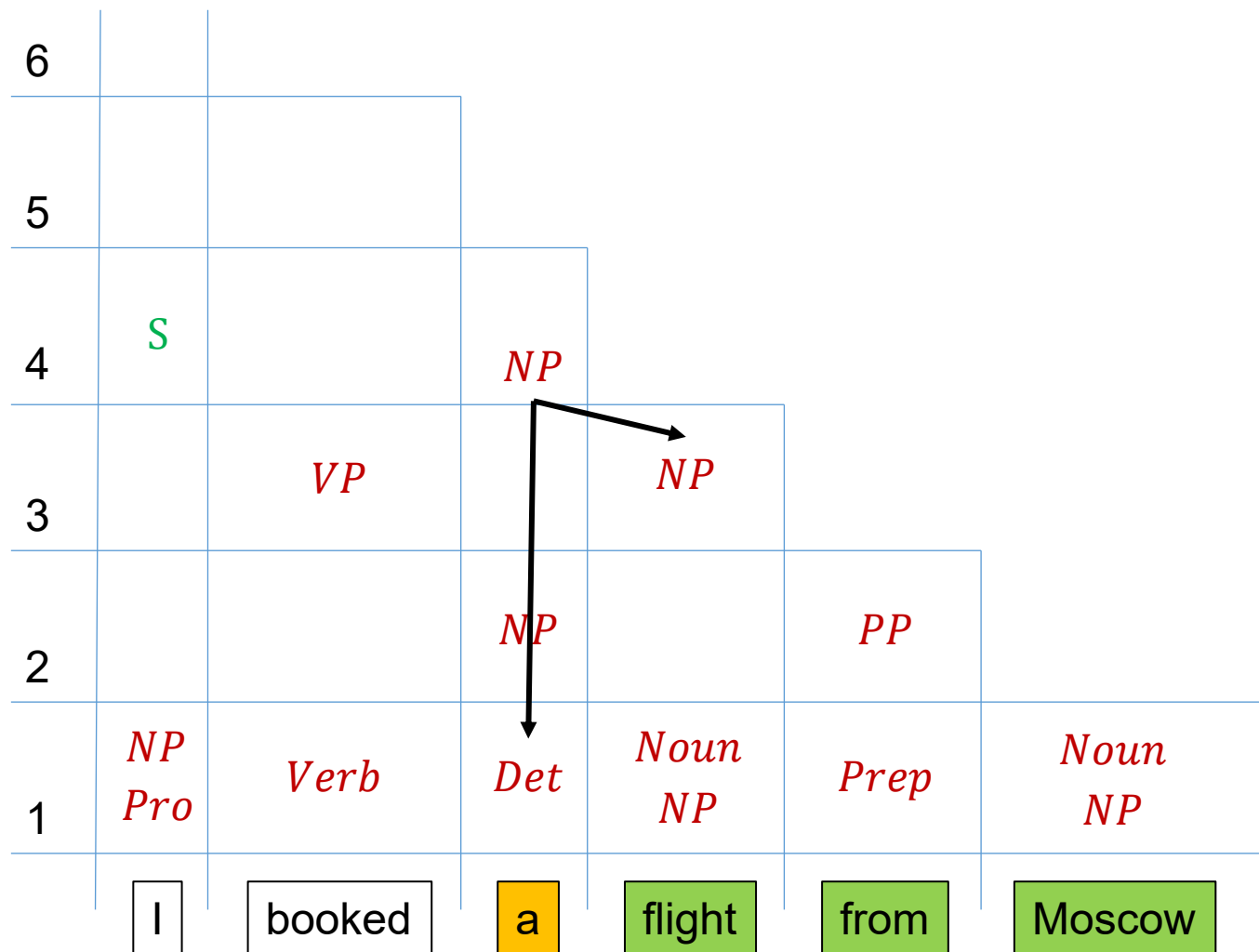
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СΥΚ



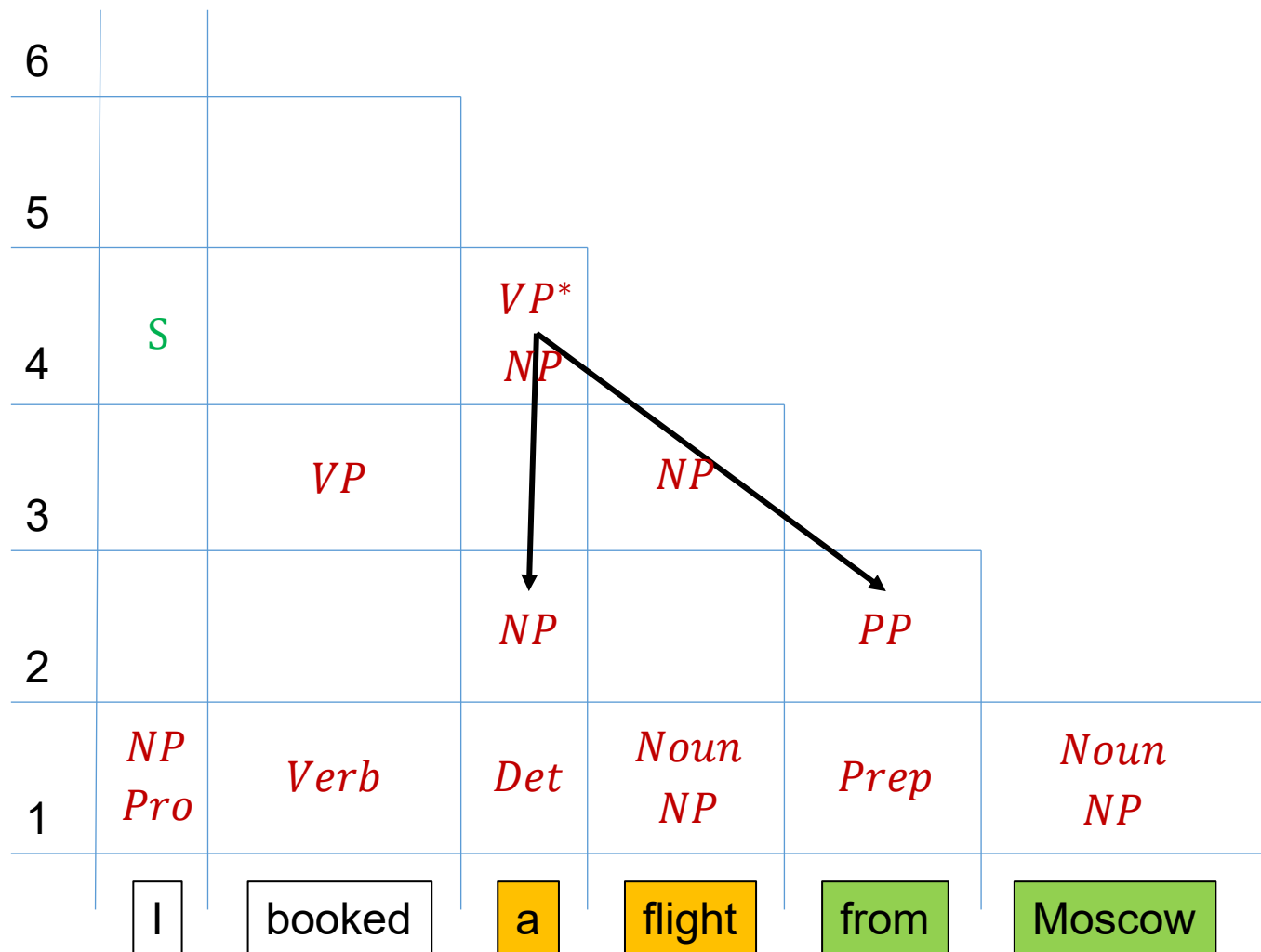
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



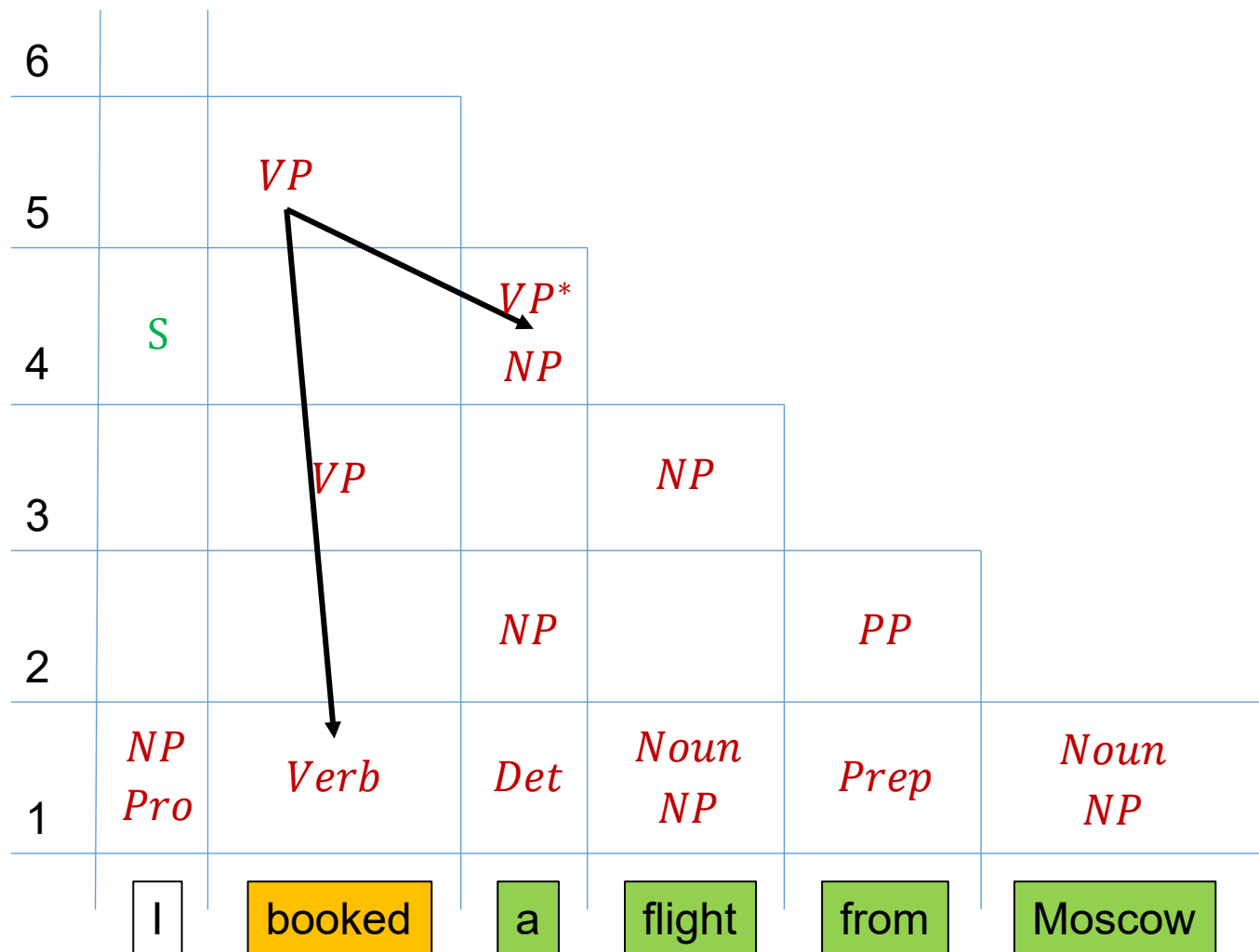
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



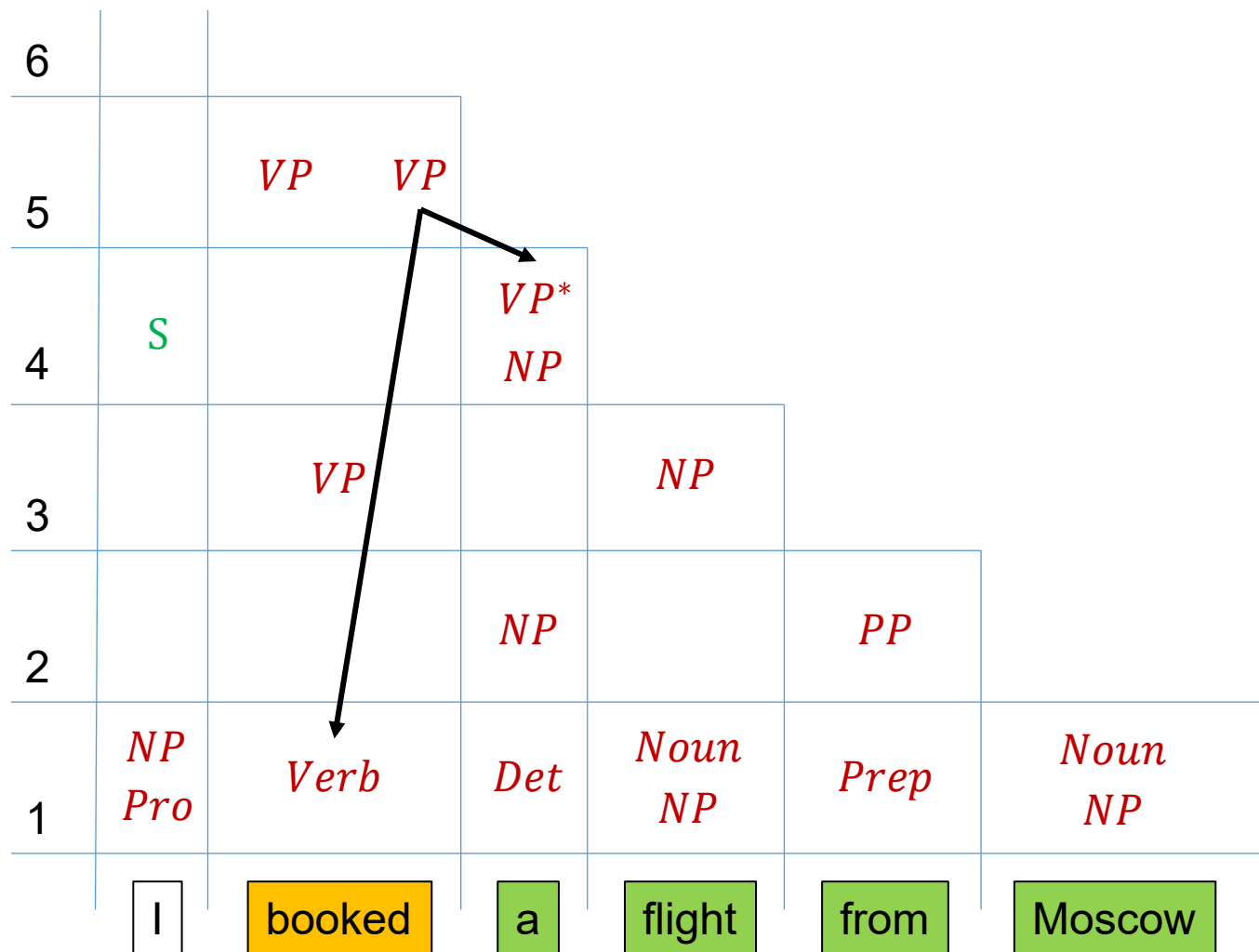
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



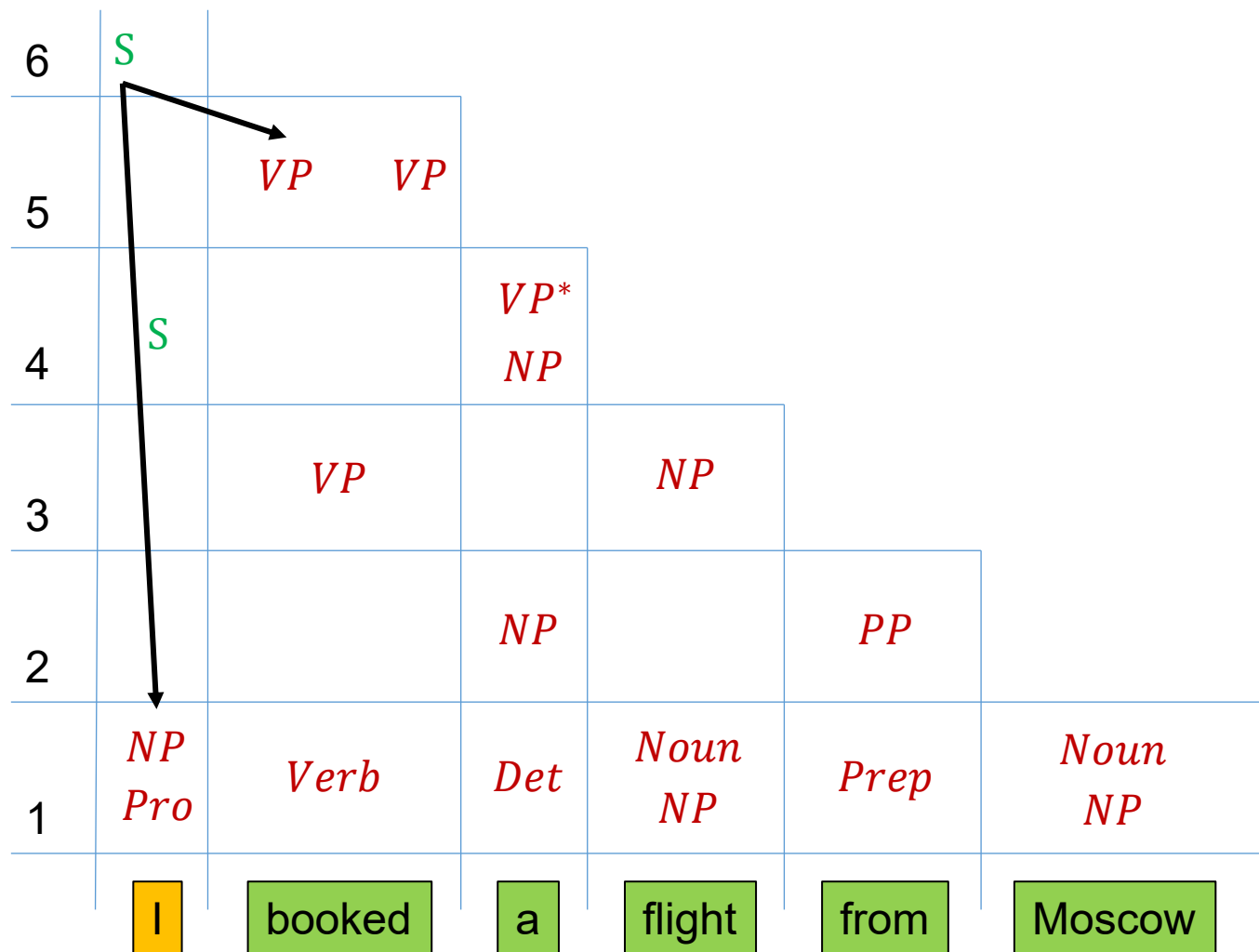
1. *S* → *NP VP*
2. *VP* → *Verb NP*
3. *VP* → *Verb VP**
4. *VP** → *NP PP*
5. *NP* → *I*
6. *NP* → *Det NP*
7. *NP* → *Noun PP*
8. *NP* → *flight*
9. *NP* → *Moscow*
10. *PP* → *Prep Noun*
11. *Verb* → *booked*
12. *Noun* → *flight*
13. *Noun* → *Moscow*
14. *Pro* → *I*
15. *Det* → *a*
16. *Det* → *the*
17. *Prep* → *from*

Алгоритм СҮК



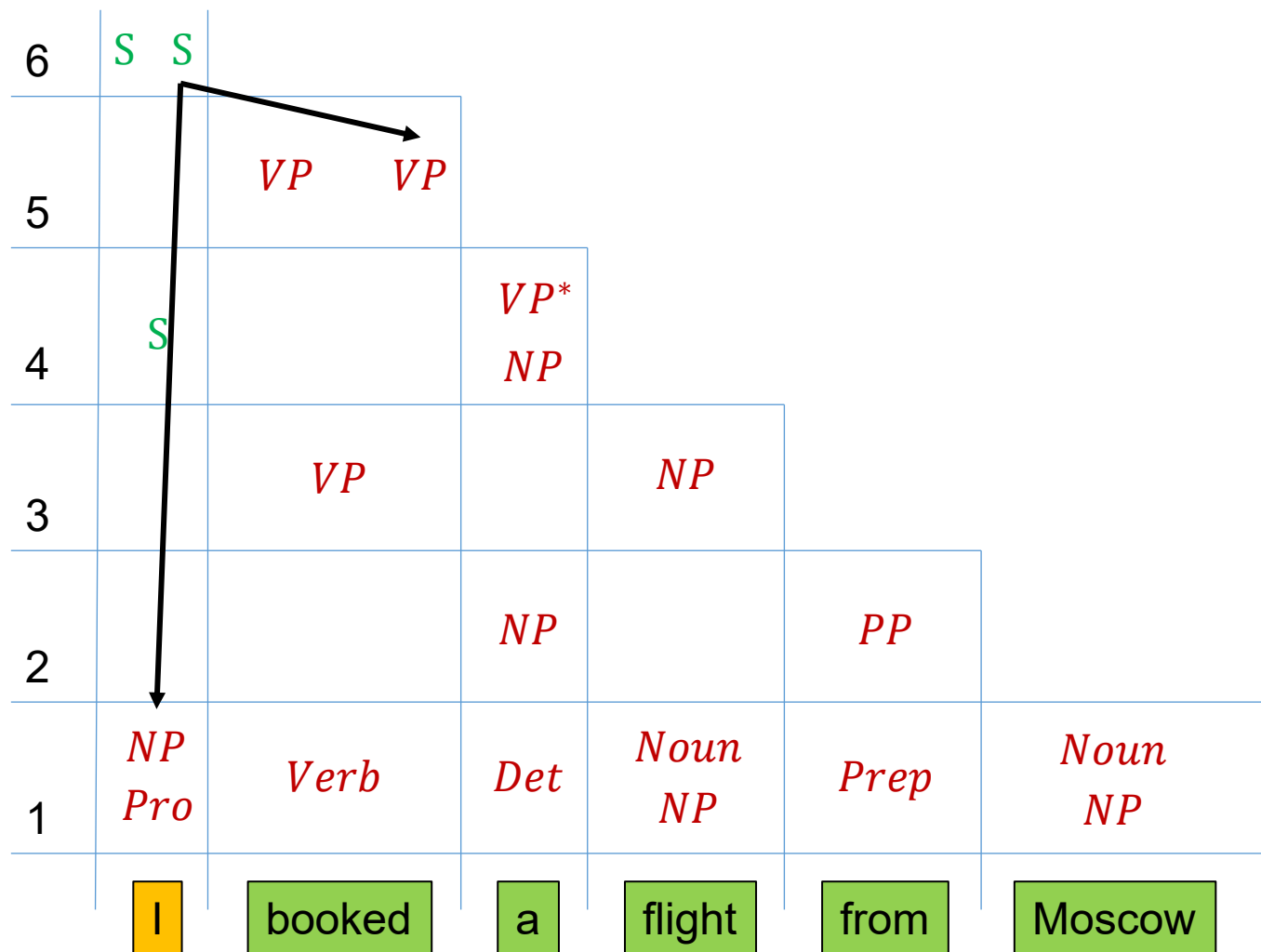
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



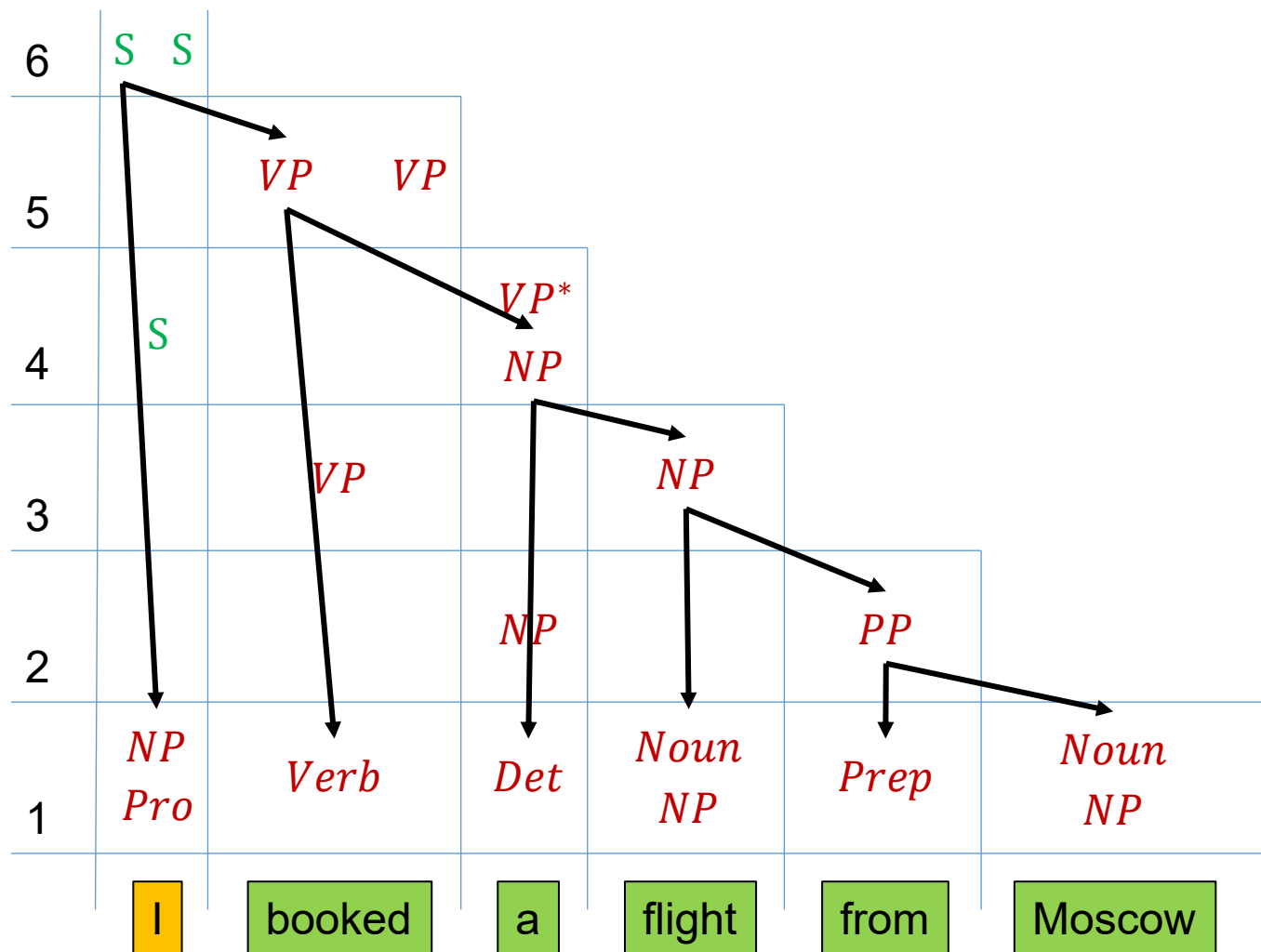
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



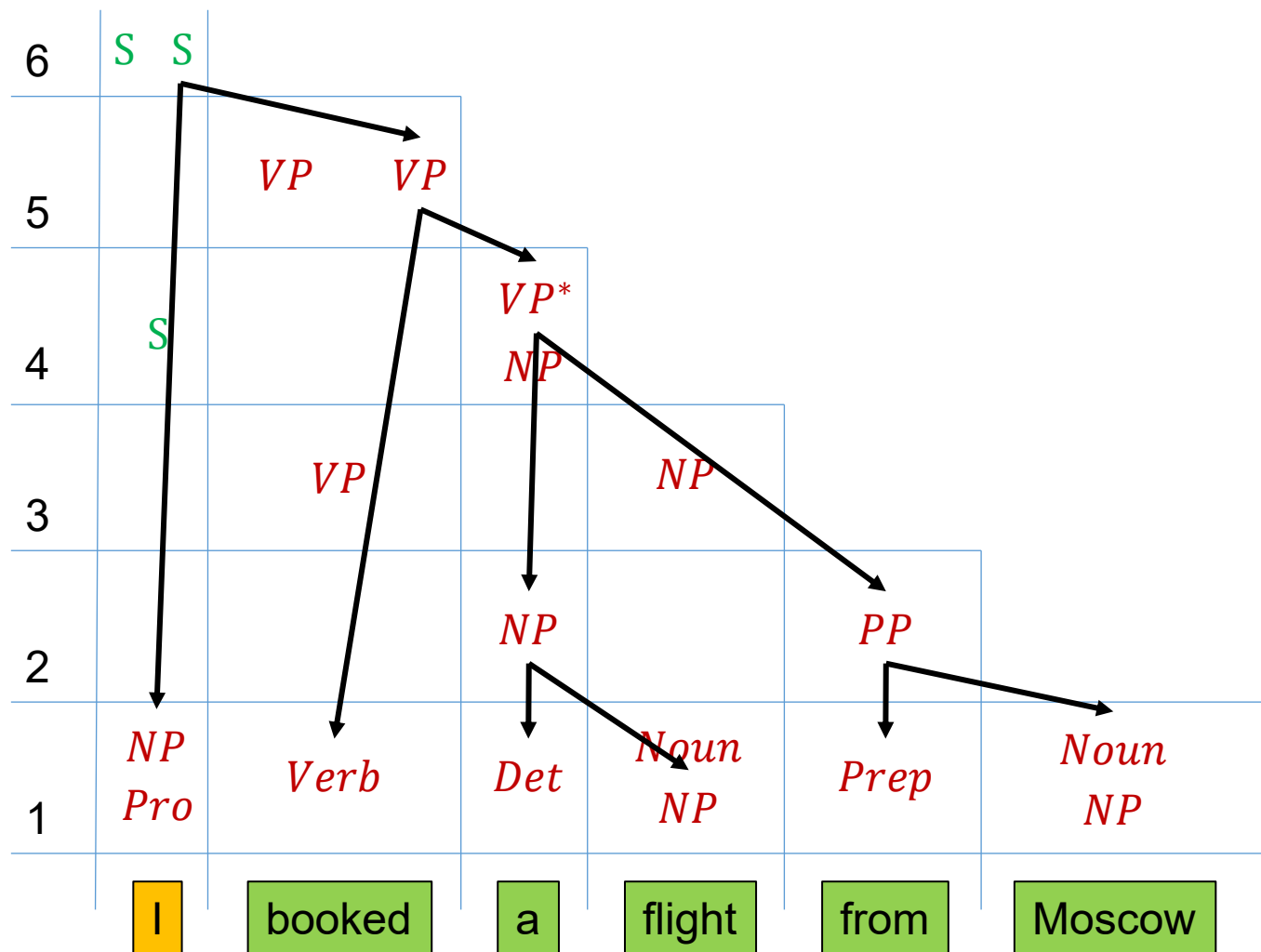
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



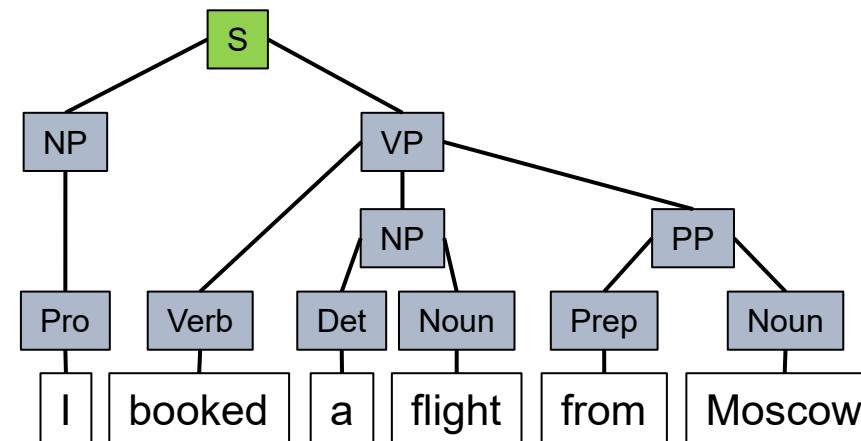
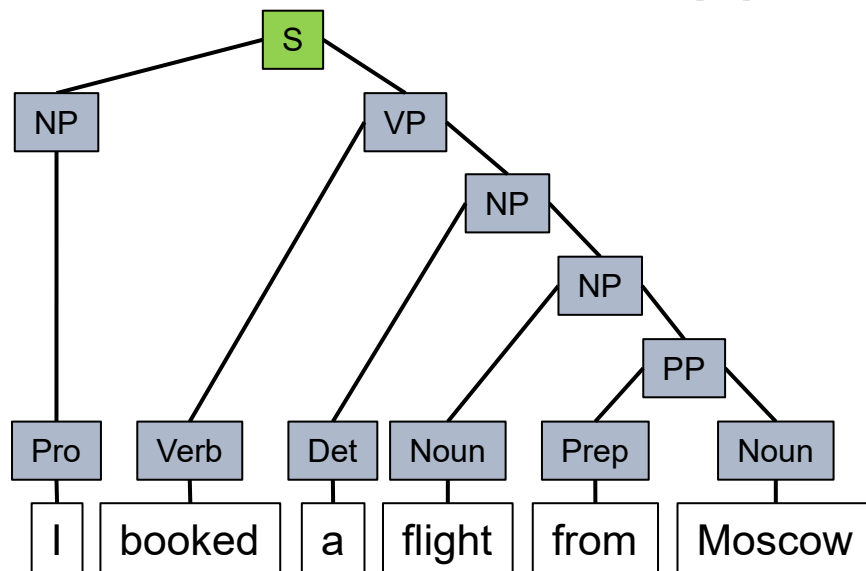
1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Алгоритм СҮК



1. $S \rightarrow NP VP$
2. $VP \rightarrow Verb NP$
3. $VP \rightarrow Verb VP^*$
4. $VP^* \rightarrow NP PP$
5. $NP \rightarrow I$
6. $NP \rightarrow Det NP$
7. $NP \rightarrow Noun PP$
8. $NP \rightarrow flight$
9. $NP \rightarrow Moscow$
10. $PP \rightarrow Prep Noun$
11. $Verb \rightarrow booked$
12. $Noun \rightarrow flight$
13. $Noun \rightarrow Moscow$
14. $Pro \rightarrow I$
15. $Det \rightarrow a$
16. $Det \rightarrow the$
17. $Prep \rightarrow from$

Неоднозначность языка



- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. $S \rightarrow NP VP$ | 10. $Verb \rightarrow booked$ |
| 2. $VP \rightarrow Verb NP$ | 11. $Noun \rightarrow Moscow$ |
| 3. $VP \rightarrow Verb NP PP$ | 12. $Pro \rightarrow I$ |
| 4. $NP \rightarrow Pro$ | 13. $Det \rightarrow a$ |
| 5. $NP \rightarrow Det NP$ | 14. $Det \rightarrow the$ |
| 6. $NP \rightarrow Noun PP$ | 15. $Prep \rightarrow from$ |
| 7. $NP \rightarrow Noun$ | |
| 8. $PP \rightarrow Prep Noun$ | |
| 9. $Noun \rightarrow flight$ | |

Выбор лучшего дерева

- Зададим каждому правилу вероятность его применения
- Будем оценивать вероятность разбора, как произведение вероятностей правил, участвующих в нем

$$p(tree) = \prod_i p(\alpha_i \rightarrow \beta_i)$$

$$p(\alpha \rightarrow \beta) = \frac{Count(\alpha \rightarrow \beta)}{Count(\alpha)}$$

$$t^*(s) = \arg \max_{t \in T(s)} p(t)$$

Выбор лучшего дерева

- Зададим каждому правилу вероятность его применения
- Будем оценивать вероятность разбора, как произведение вероятностей правил, участвующих в нем

$$p(\text{tree}) = \prod_i p(\alpha_i \rightarrow \beta_i)$$

$$p(\alpha \rightarrow \beta) = \frac{\text{Count}(\alpha \rightarrow \beta)}{\text{Count}(\alpha)}$$

$$t^*(s) = \arg \max_{t \in T(s)} p(t)$$

1. <i>S</i> → <i>NP VP</i>	1.0
2. <i>VP</i> → <i>Verb NP</i>	0.9
3. <i>VP</i> → <i>Verb NP PP</i>	0.1
4. <i>NP</i> → <i>Pro</i>	0.2
5. <i>NP</i> → <i>Det NP</i>	0.3
6. <i>NP</i> → <i>Noun PP</i>	0.1
7. <i>NP</i> → <i>Noun</i>	0.4
8. <i>PP</i> → <i>Prep Noun</i>	1.0
9. <i>Verb</i> → <i>booked</i>	1.0
10. <i>Noun</i> → <i>flight</i>	0.3
11. <i>Noun</i> → <i>Moscow</i>	0.7

Алгоритм СΥΚ

6						
5						
4						
3						
2						
1	<i>NP</i> <i>Pro</i>	<i>Verb</i>	<i>Det</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>	<i>Prep</i>	<i>Noun</i> <i>NP</i>
	I	booked	a	flight	from	Moscow

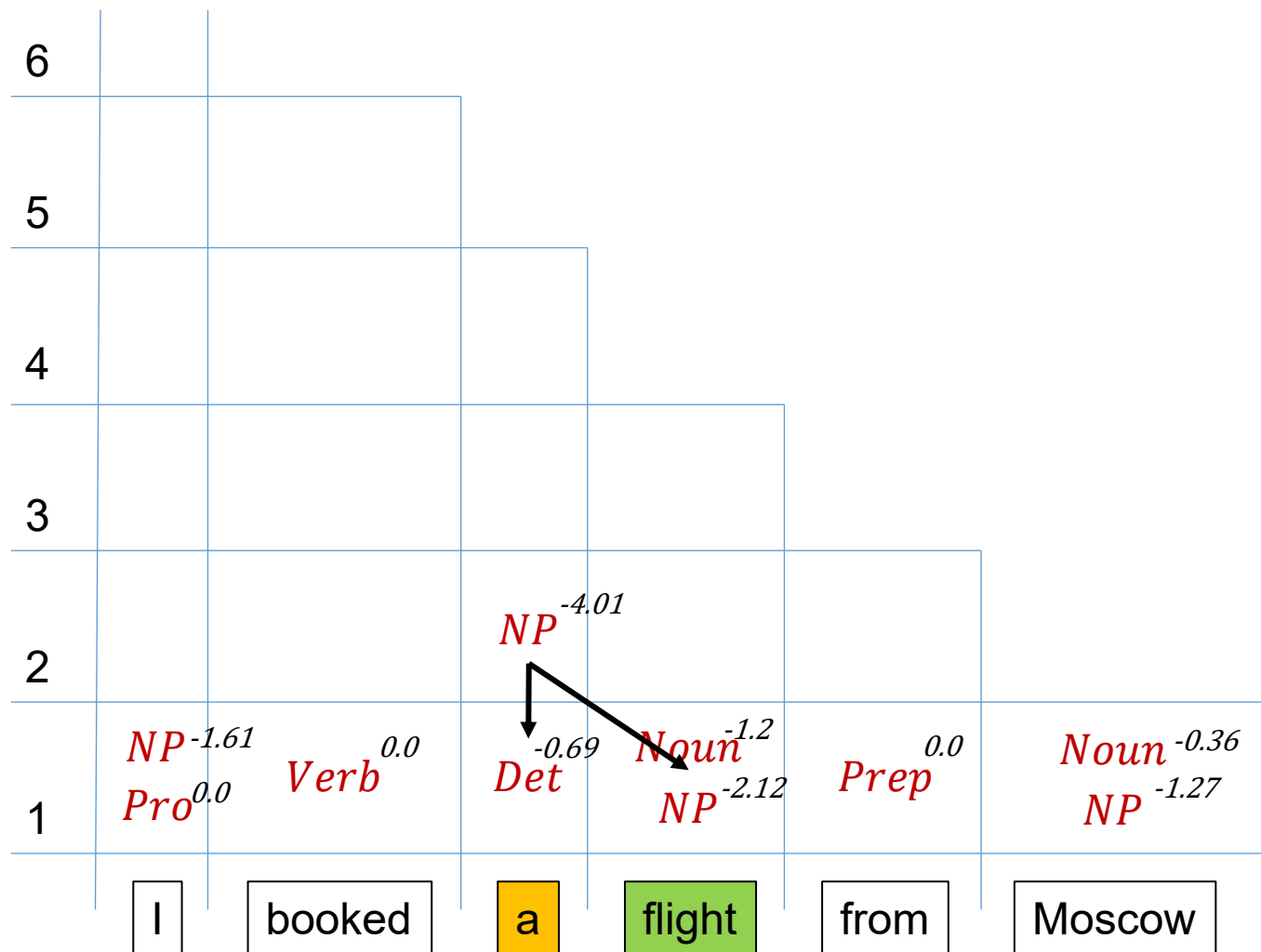
1.	<i>S</i> → <i>NP VP</i>	1.0
2.	<i>VP</i> → <i>Verb NP</i>	0.9
3.	<i>VP</i> → <i>Verb VP*</i>	0.1
4.	<i>VP*</i> → <i>NP PP</i>	1.0
5.	<i>NP</i> → <i>I</i>	0.2
6.	<i>NP</i> → <i>Det NP</i>	0.3
7.	<i>NP</i> → <i>Noun PP</i>	0.1
8.	<i>NP</i> → <i>flight</i>	0.12
9.	<i>NP</i> → <i>Moscow</i>	0.28
10.	<i>PP</i> → <i>Prep Noun</i>	1.0
11.	<i>Verb</i> → <i>booked</i>	1.0
12.	<i>Noun</i> → <i>flight</i>	0.3
13.	<i>Noun</i> → <i>Moscow</i>	0.7
14.	<i>Pro</i> → <i>I</i>	1.0
15.	<i>Det</i> → <i>a</i>	0.5
16.	<i>Det</i> → <i>the</i>	0.5
17.	<i>Prep</i> → <i>from</i>	1.0

Алгоритм CYK

6						
5						
4						
3						
2						
1	$NP^{-1.61}$ $Pro^{0.0}$	$Verb^{0.0}$	$Det^{-0.69}$	$Noun^{-1.2}$ $NP^{-2.12}$	$Prep^{0.0}$	$Noun^{-0.36}$ $NP^{-1.27}$
	I	booked	a	flight	from	Moscow

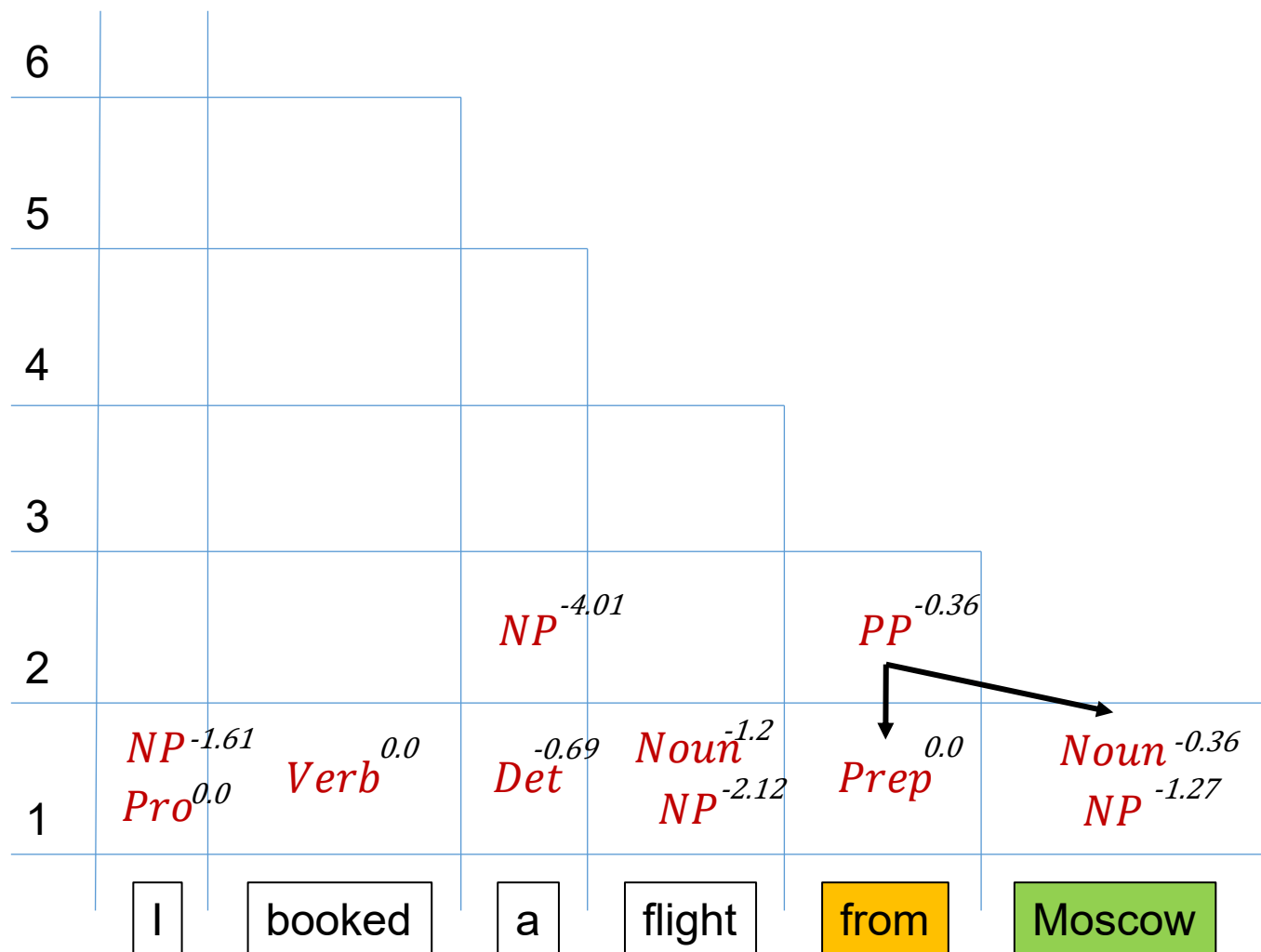
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



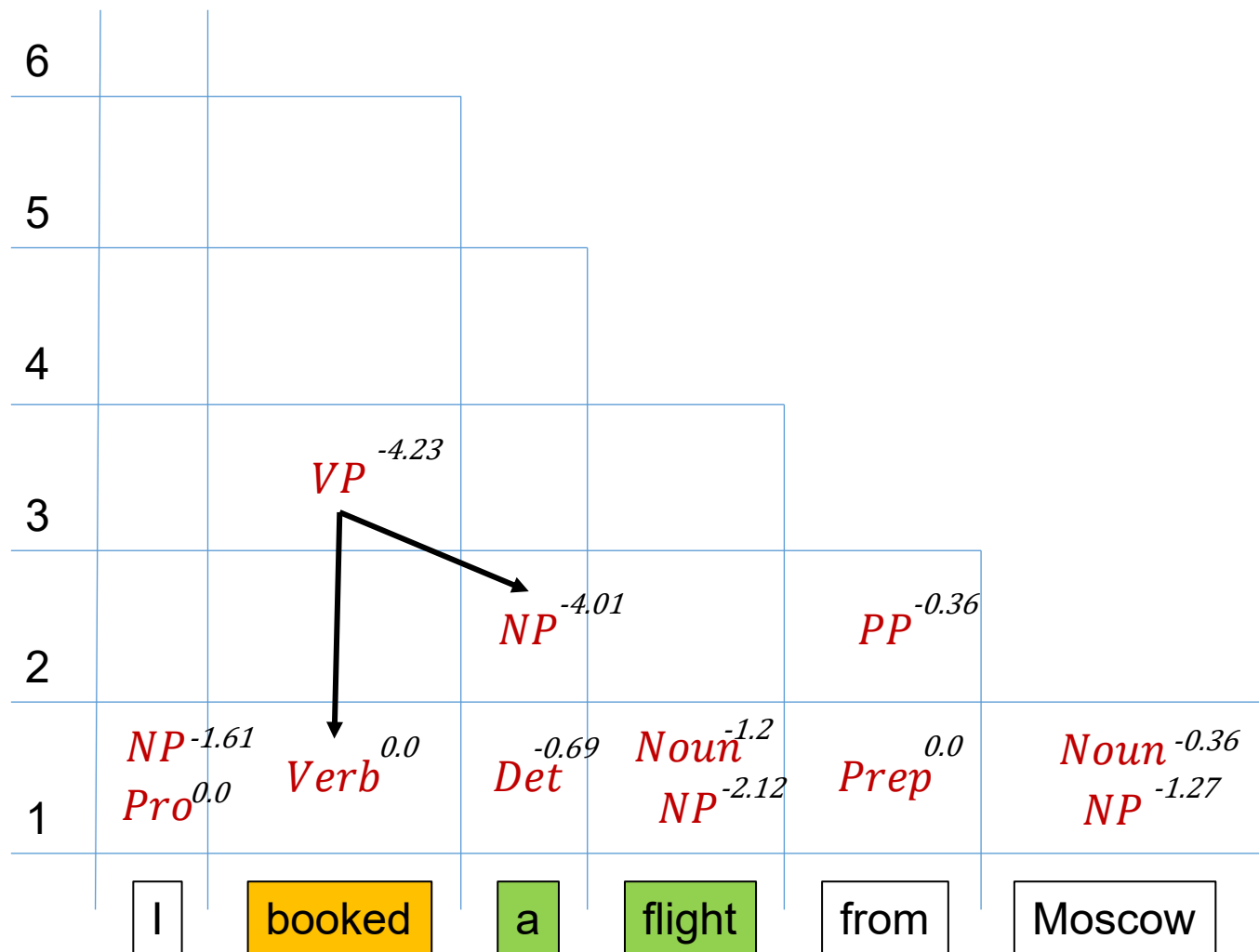
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



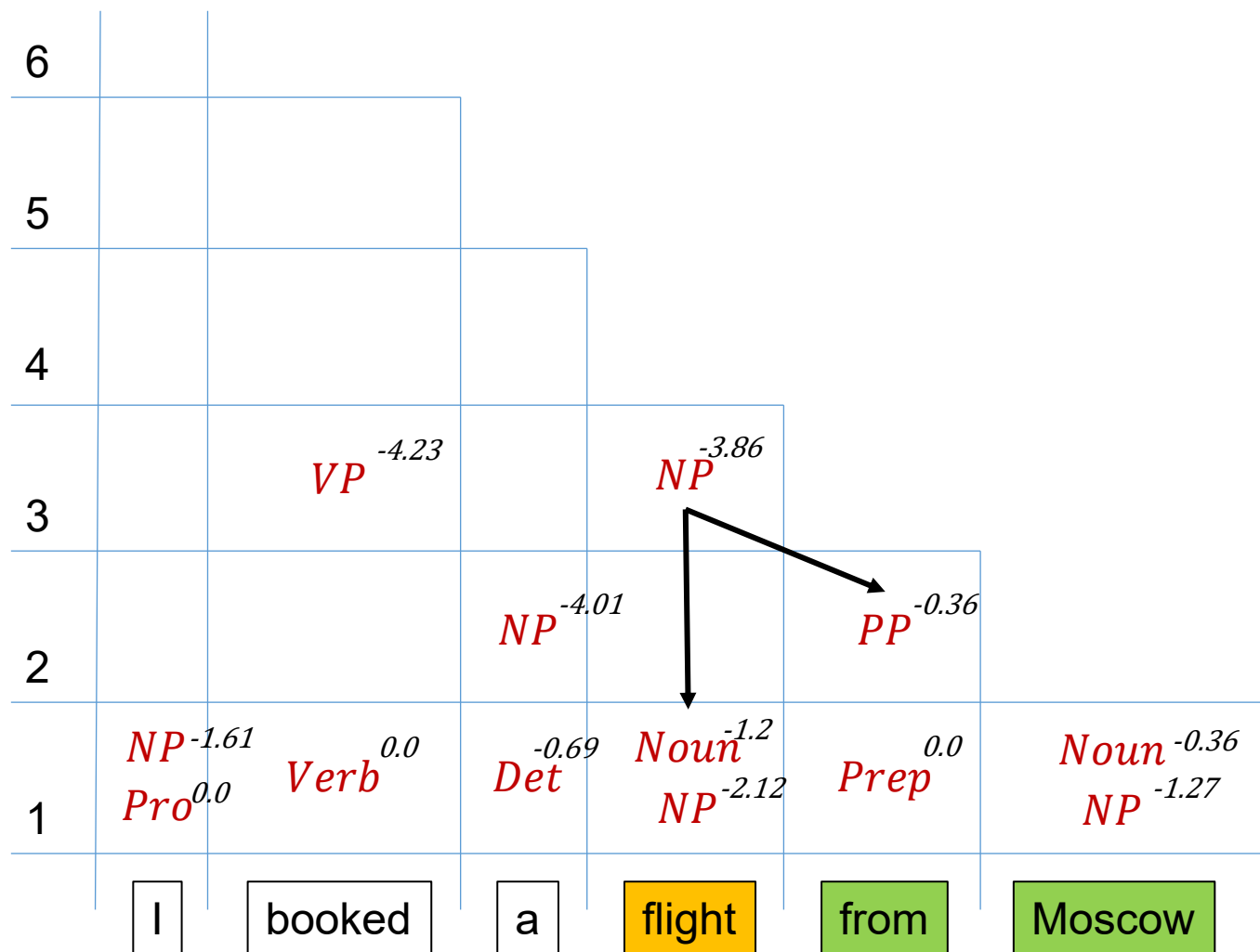
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм СҮК



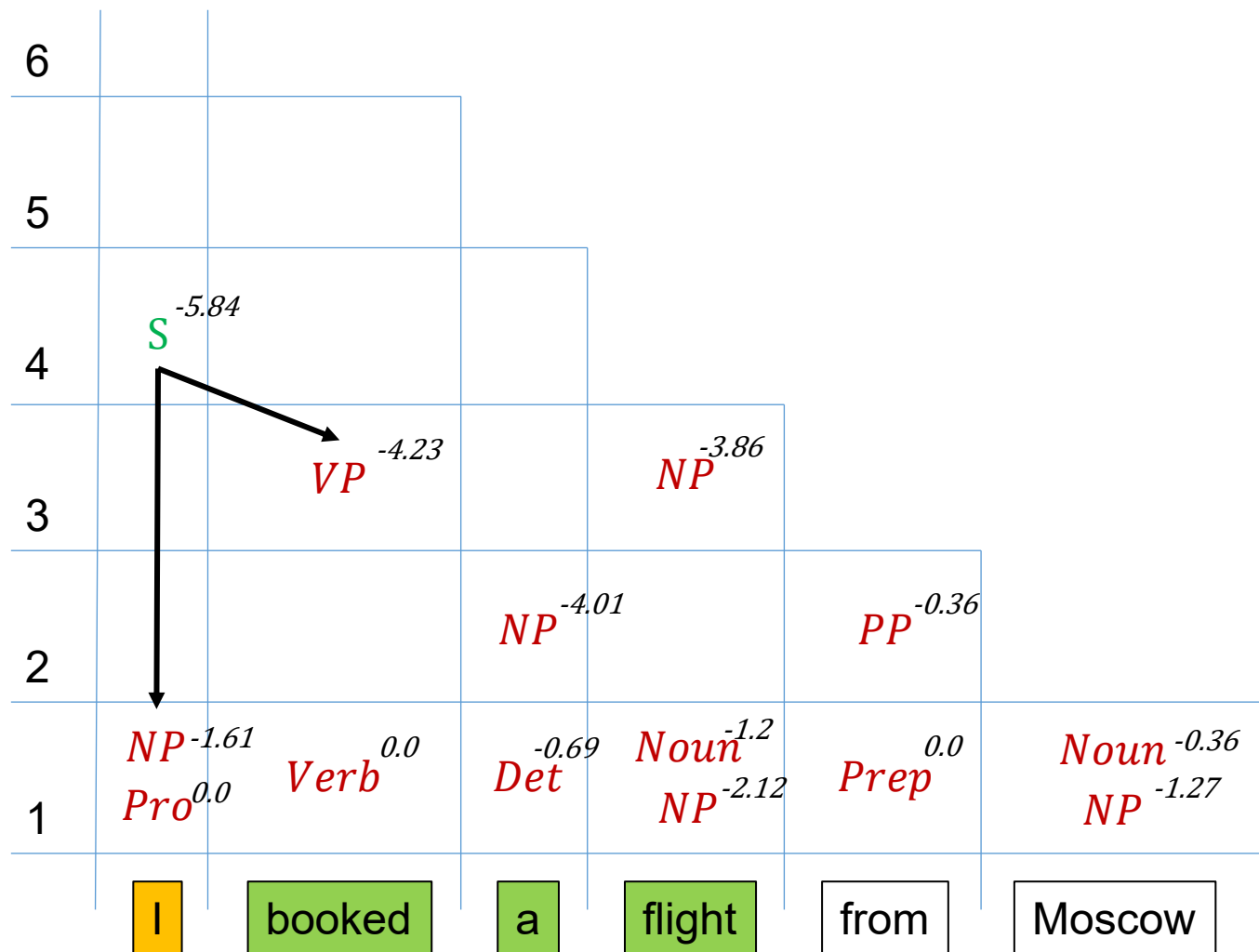
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



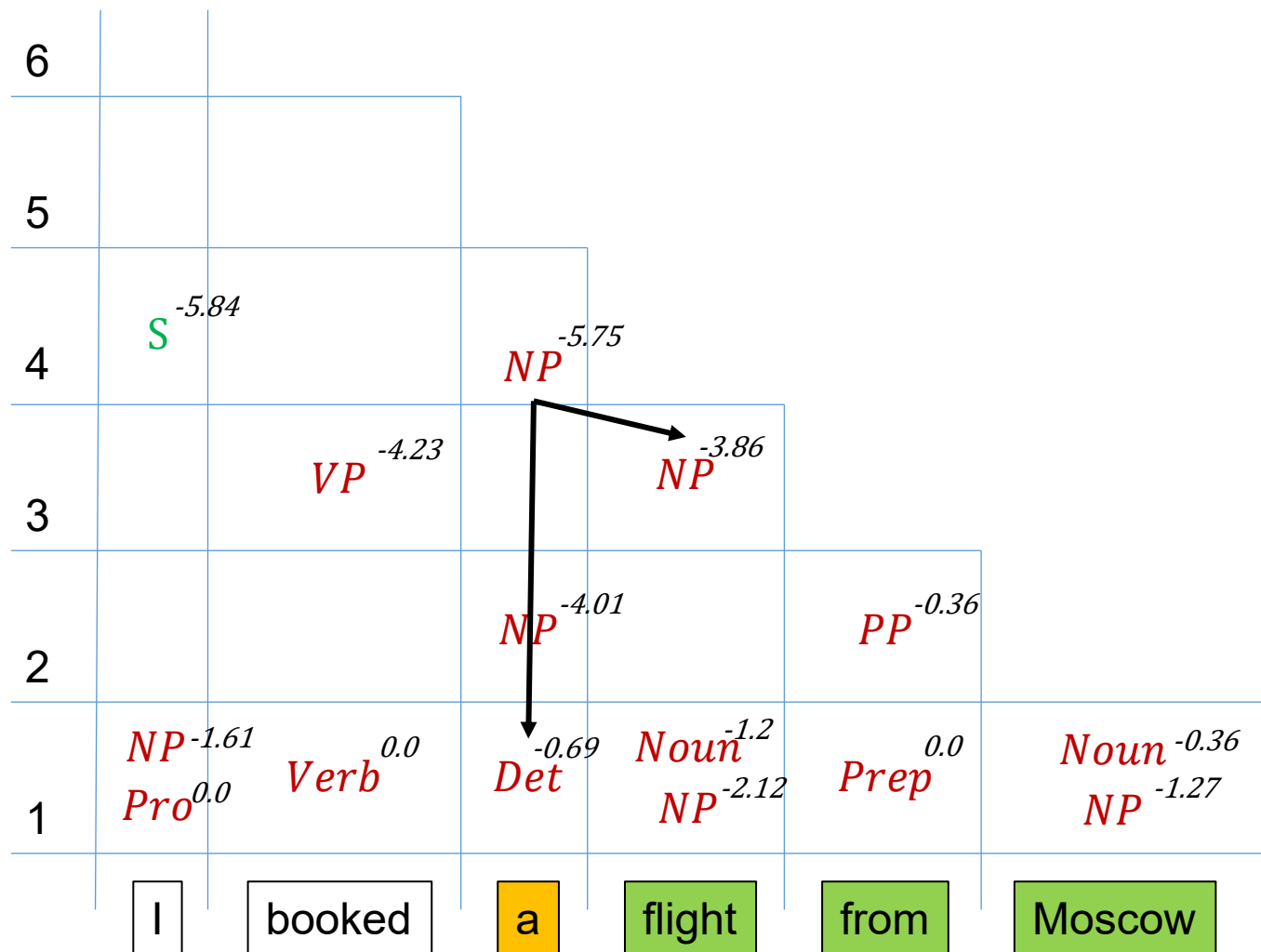
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



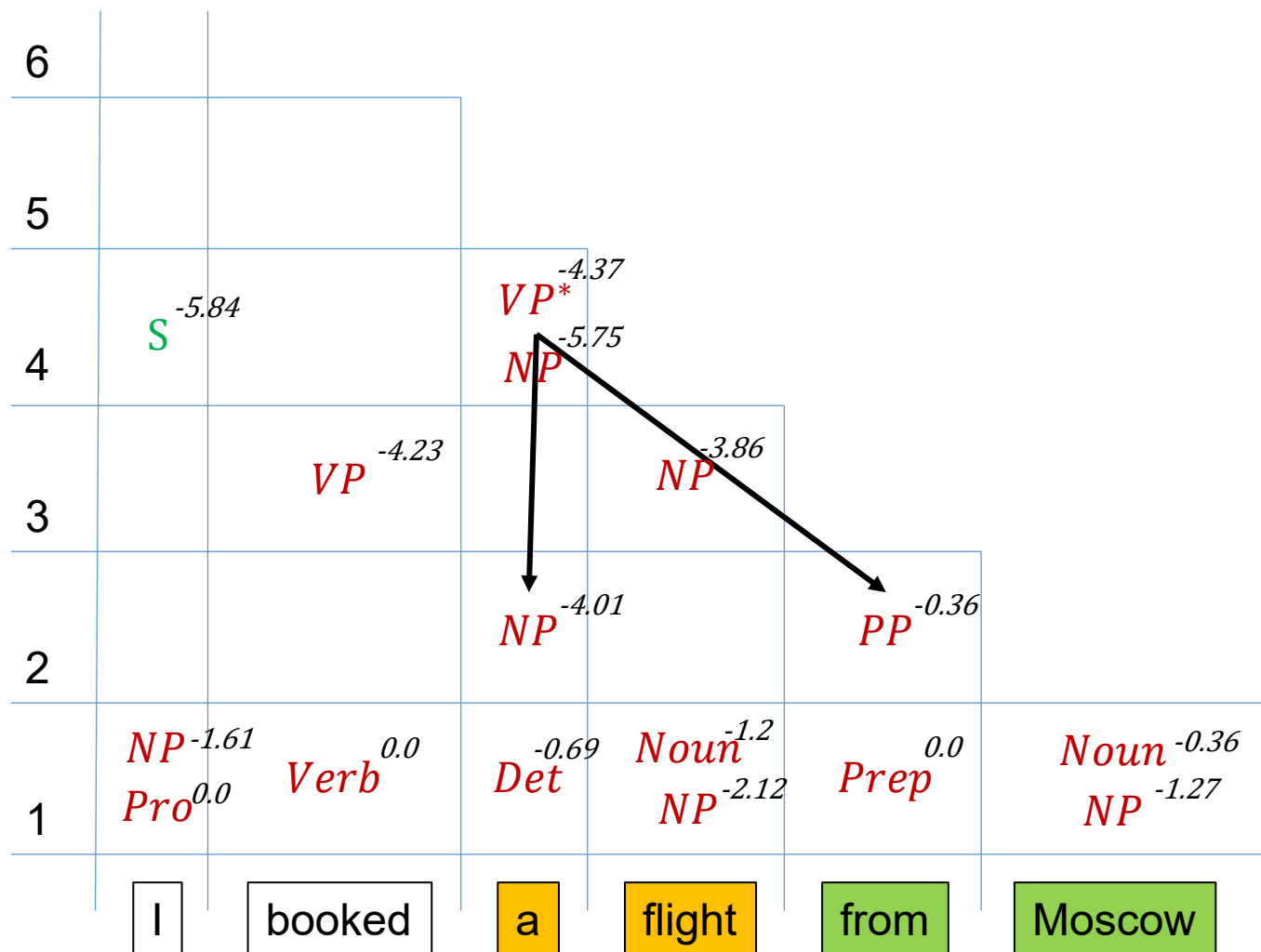
1.	<i>S</i> → <i>NP VP</i>	1.0
2.	<i>VP</i> → <i>Verb NP</i>	0.9
3.	<i>VP</i> → <i>Verb VP*</i>	0.1
4.	<i>VP*</i> → <i>NP PP</i>	1.0
5.	<i>NP</i> → <i>I</i>	0.2
6.	<i>NP</i> → <i>Det NP</i>	0.3
7.	<i>NP</i> → <i>Noun PP</i>	0.1
8.	<i>NP</i> → <i>flight</i>	0.12
9.	<i>NP</i> → <i>Moscow</i>	0.28
10.	<i>PP</i> → <i>Prep Noun</i>	1.0
11.	<i>Verb</i> → <i>booked</i>	1.0
12.	<i>Noun</i> → <i>flight</i>	0.3
13.	<i>Noun</i> → <i>Moscow</i>	0.7
14.	<i>Pro</i> → <i>I</i>	1.0
15.	<i>Det</i> → <i>a</i>	0.5
16.	<i>Det</i> → <i>the</i>	0.5
17.	<i>Prep</i> → <i>from</i>	1.0

Алгоритм CYK



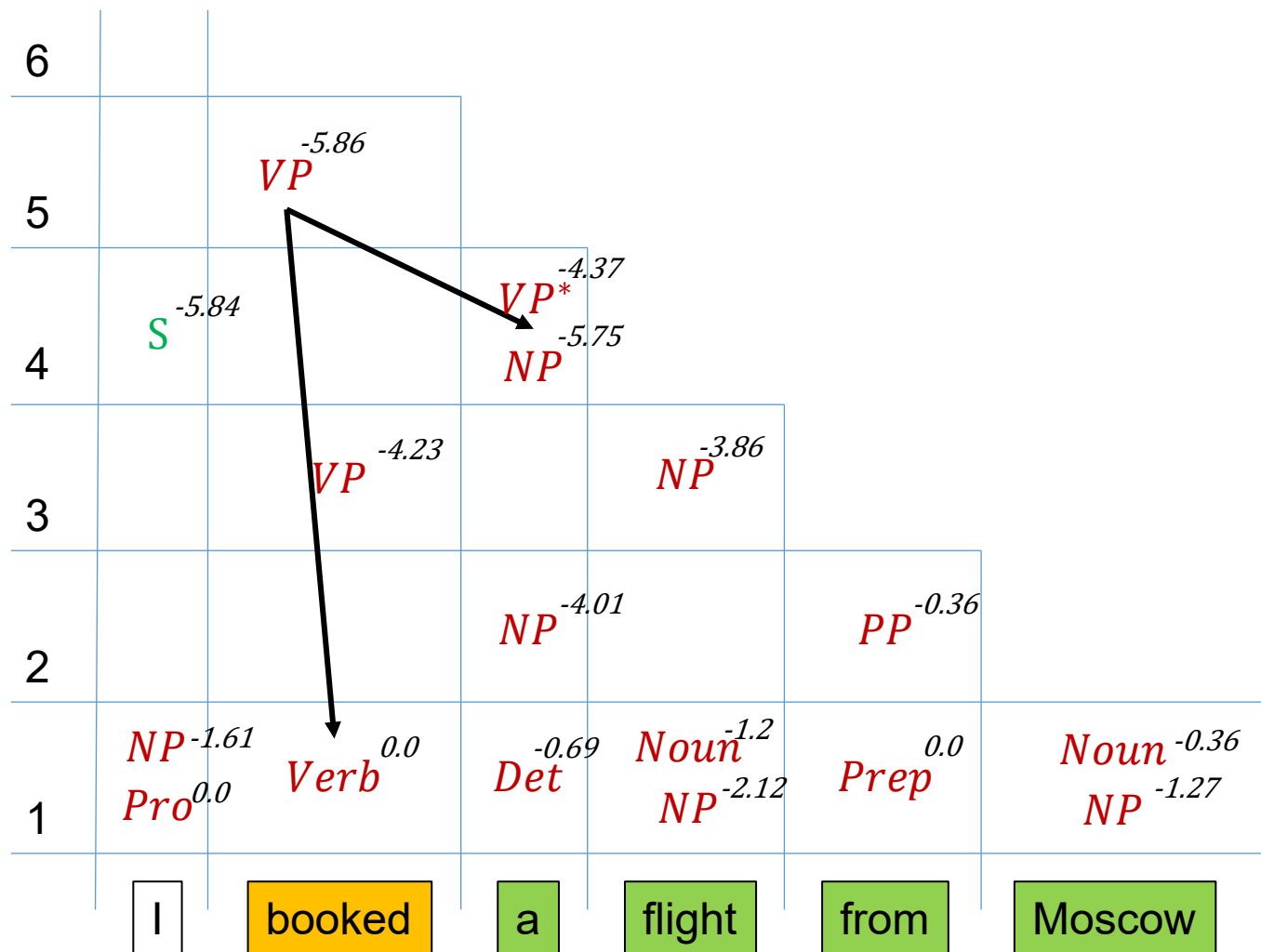
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



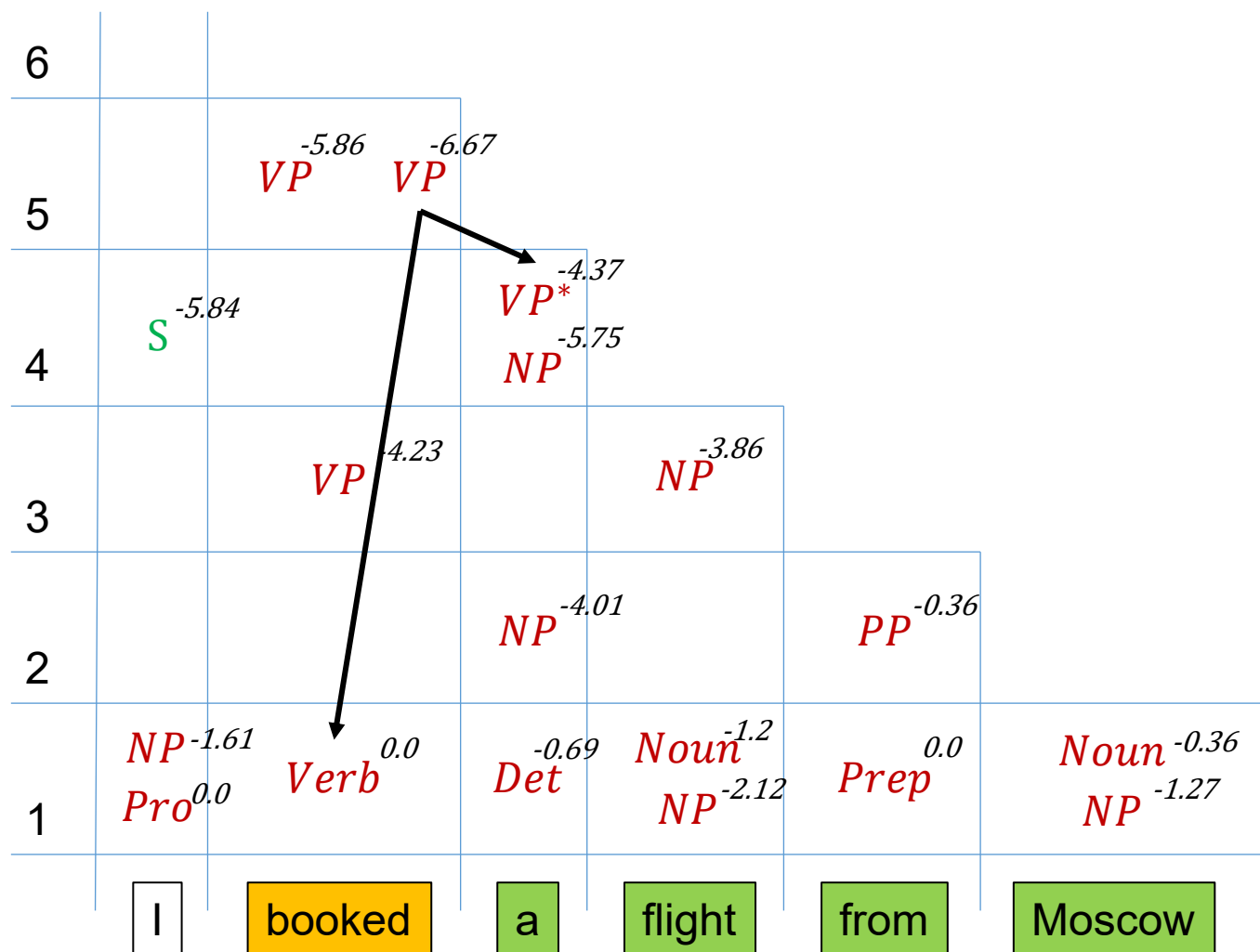
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



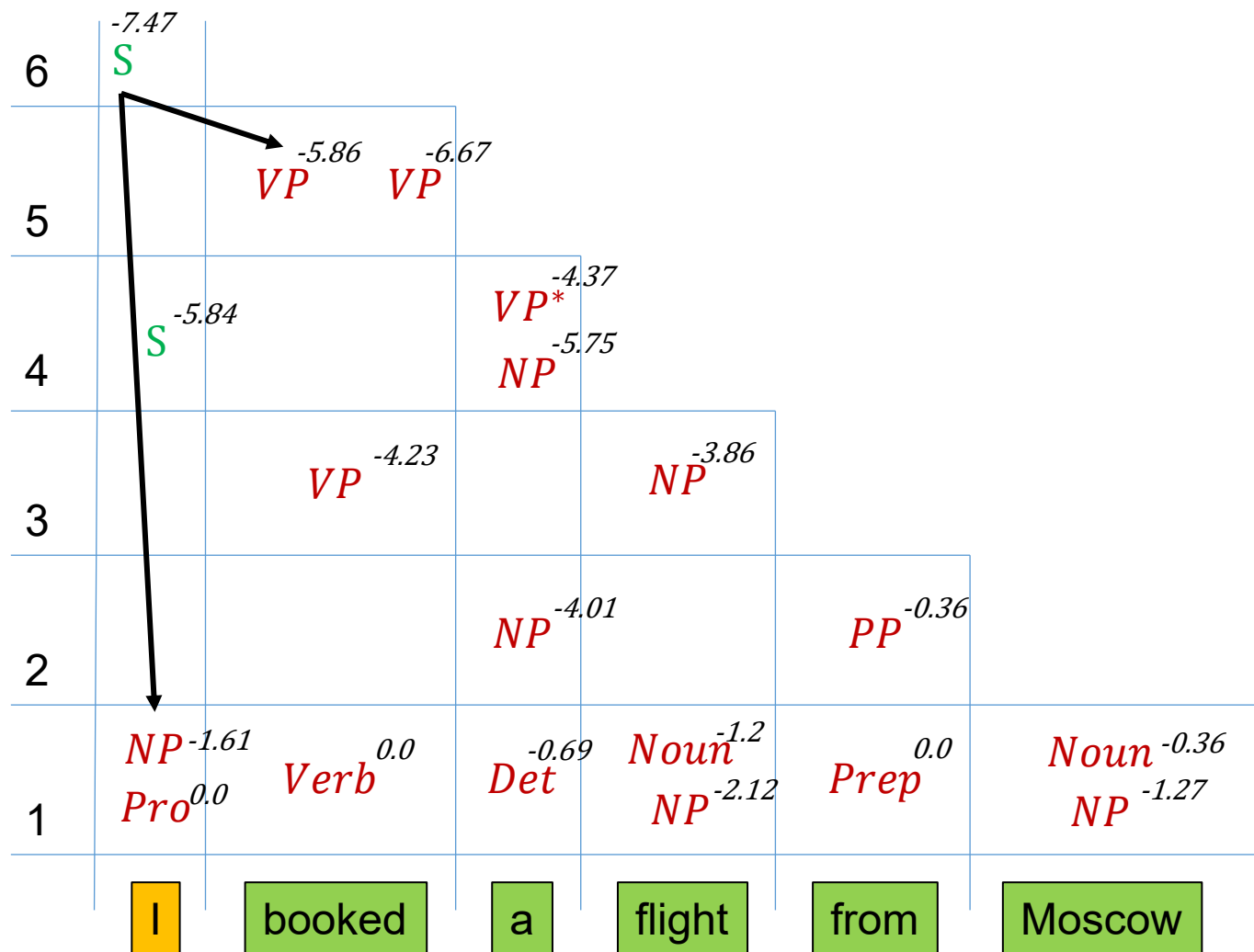
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



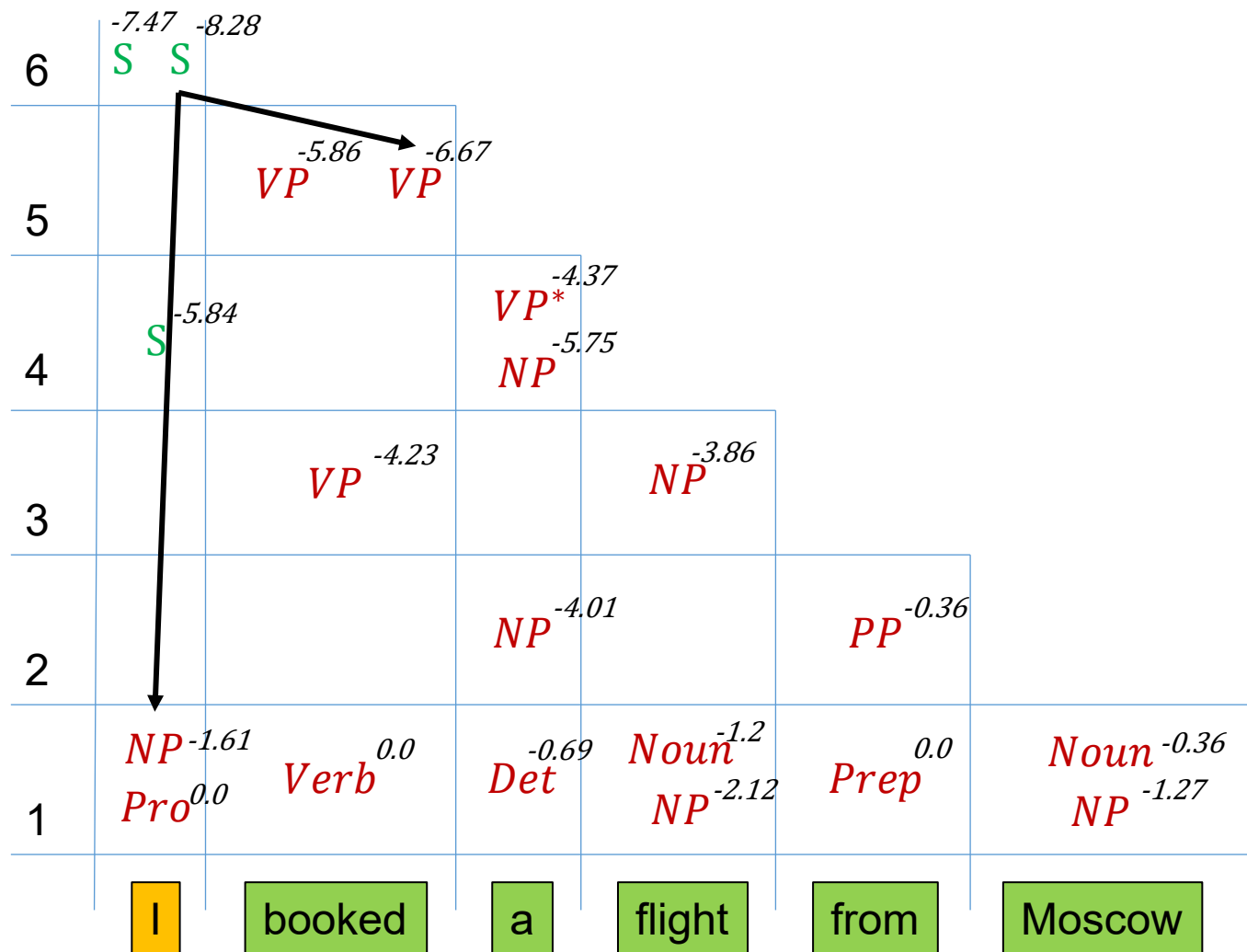
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Алгоритм CYK



1.	<i>S</i> → <i>NP VP</i>	1.0
2.	<i>VP</i> → <i>Verb NP</i>	0.9
3.	<i>VP</i> → <i>Verb VP*</i>	0.1
4.	<i>VP*</i> → <i>NP PP</i>	1.0
5.	<i>NP</i> → <i>I</i>	0.2
6.	<i>NP</i> → <i>Det NP</i>	0.3
7.	<i>NP</i> → <i>Noun PP</i>	0.1
8.	<i>NP</i> → <i>flight</i>	0.12
9.	<i>NP</i> → <i>Moscow</i>	0.28
10.	<i>PP</i> → <i>Prep Noun</i>	1.0
11.	<i>Verb</i> → <i>booked</i>	1.0
12.	<i>Noun</i> → <i>flight</i>	0.3
13.	<i>Noun</i> → <i>Moscow</i>	0.7
14.	<i>Pro</i> → <i>I</i>	1.0
15.	<i>Det</i> → <i>a</i>	0.5
16.	<i>Det</i> → <i>the</i>	0.5
17.	<i>Prep</i> → <i>from</i>	1.0

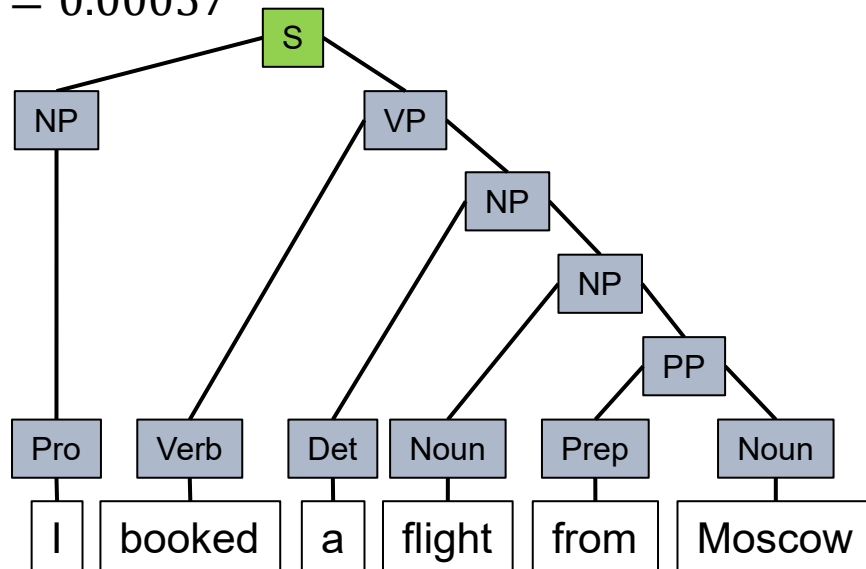
Алгоритм CYK



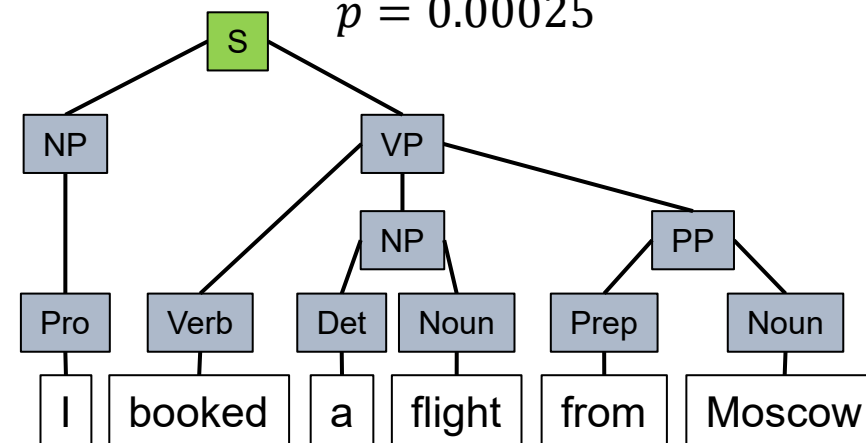
1.	$S \rightarrow NP VP$	1.0
2.	$VP \rightarrow Verb NP$	0.9
3.	$VP \rightarrow Verb VP^*$	0.1
4.	$VP^* \rightarrow NP PP$	1.0
5.	$NP \rightarrow I$	0.2
6.	$NP \rightarrow Det NP$	0.3
7.	$NP \rightarrow Noun PP$	0.1
8.	$NP \rightarrow flight$	0.12
9.	$NP \rightarrow Moscow$	0.28
10.	$PP \rightarrow Prep Noun$	1.0
11.	$Verb \rightarrow booked$	1.0
12.	$Noun \rightarrow flight$	0.3
13.	$Noun \rightarrow Moscow$	0.7
14.	$Pro \rightarrow I$	1.0
15.	$Det \rightarrow a$	0.5
16.	$Det \rightarrow the$	0.5
17.	$Prep \rightarrow from$	1.0

Неоднозначность языка

$p = 0.00057$



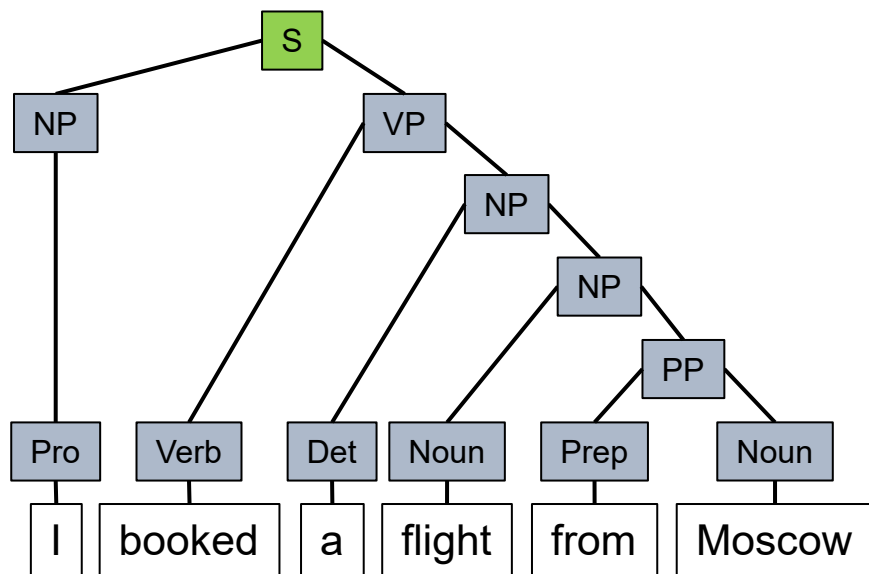
$p = 0.00025$



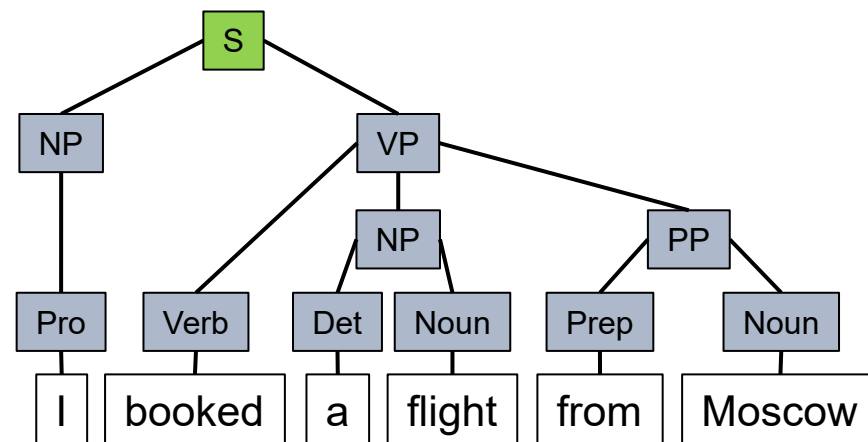
- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. $S \rightarrow NP VP$ | 10. $Verb \rightarrow booked$ |
| 2. $VP \rightarrow Verb NP$ | 11. $Noun \rightarrow Moscow$ |
| 3. $VP \rightarrow Verb NP PP$ | 12. $Pro \rightarrow I$ |
| 4. $NP \rightarrow Pro$ | 13. $Det \rightarrow a$ |
| 5. $NP \rightarrow Det NP$ | 14. $Det \rightarrow the$ |
| 6. $NP \rightarrow Noun PP$ | 15. $Prep \rightarrow from$ |
| 7. $NP \rightarrow Noun$ | |
| 8. $PP \rightarrow Prep Noun$ | |
| 9. $Noun \rightarrow flight$ | |

Оценка качества

Gold:

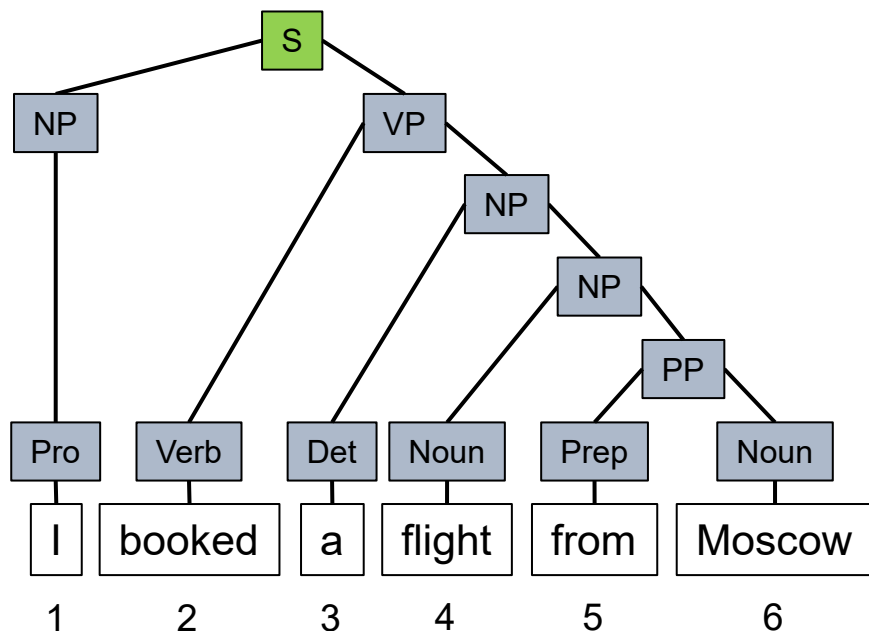


Predicted:

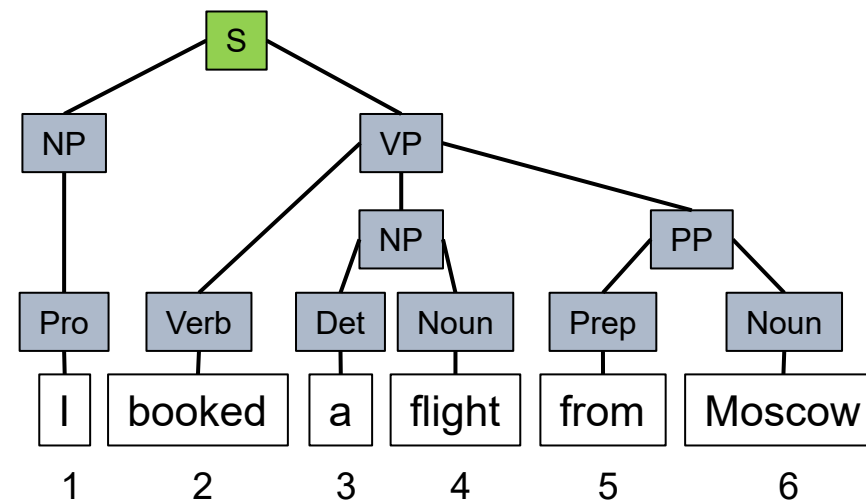


Оценка качества

Gold:



Predicted:



- Gold:
S(1:6), NP(1:1), VP(2:6), NP(3:6), NP(4:6), PP(5:6)
- Predicted:
S(1:6), NP(1:1), VP(2:6), NP(3:4), PP(5:6)

Оценка качества

- $Recall = \frac{|correct|}{|gold|}$;
 - $Precision = \frac{|correct|}{|predicted|}$;
 - $F1 = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall}$;
- Gold:
S(1:6), NP(1:1), VP(2:6), NP(3:6), NP(4:6), PP(5:6)
 - Predicted:
S(1:6), NP(1:1), VP(2:6), NP(3:4), PP(5:6)

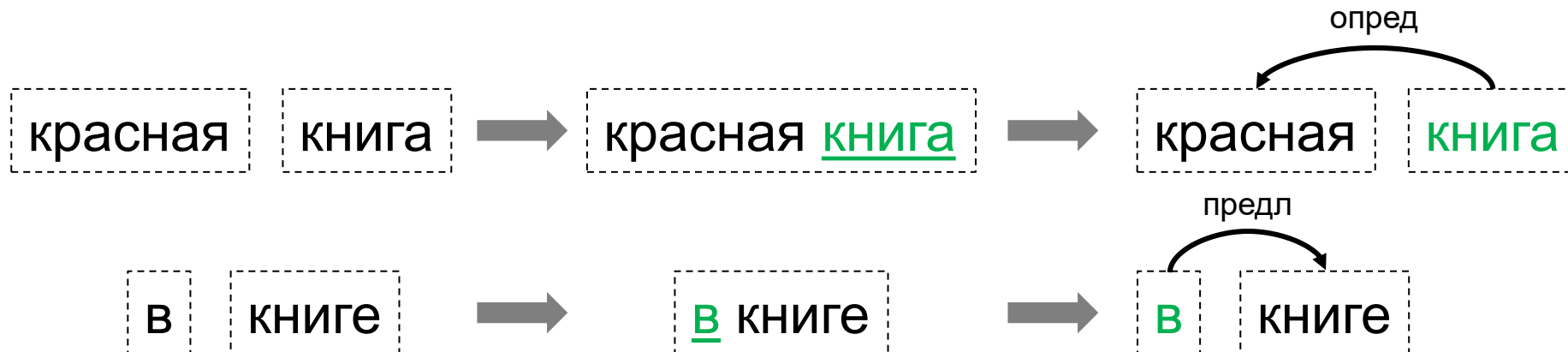
$$Recall = \frac{2}{3}$$

$$Precision = \frac{4}{5}$$

$$F1 = \frac{8}{11}$$

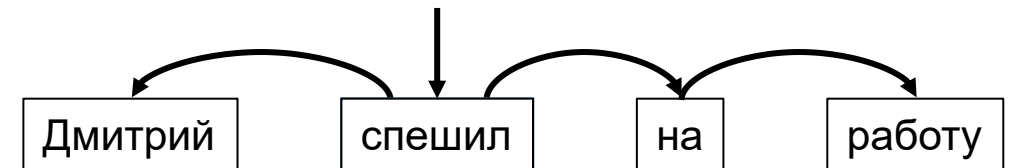
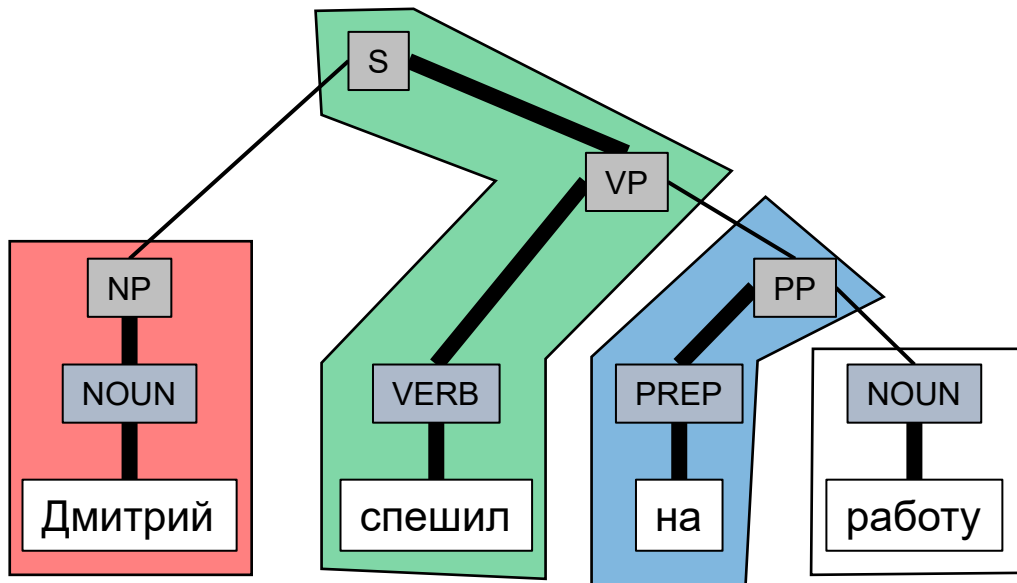
Грамматика зависимостей

- Формальная модель описания структуры словосочетаний (предложений)
- Описывается в виде иерархии слов, между которыми установлено бинарное отношение зависимости
- Различают типы зависимостей (соответствуют типам синтаксических правил)



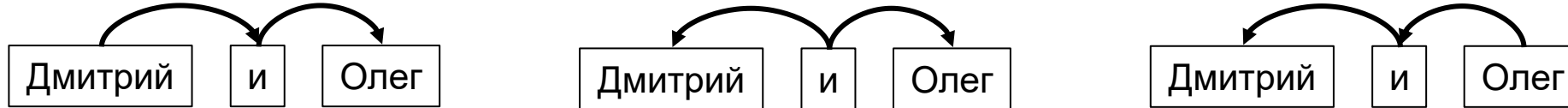
Грамматика зависимостей

- Дерево составляющих может быть преобразовано в дерево зависимостей

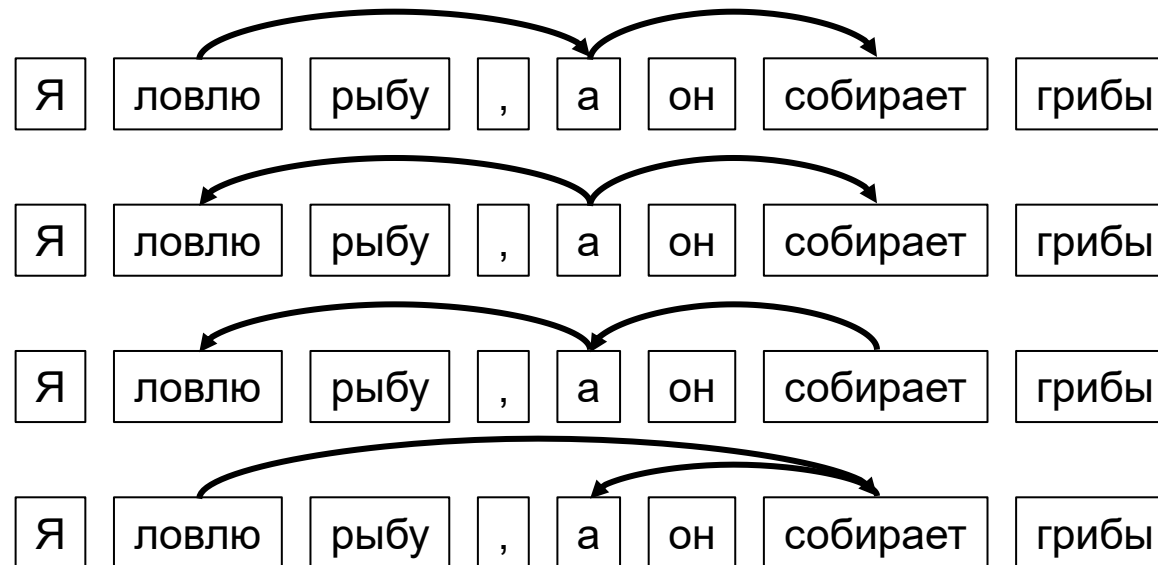


Грамматика зависимостей

- Не все синтаксические отношения подчинительные
 - Сочинительная группа

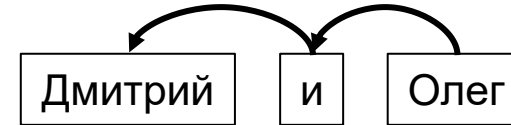
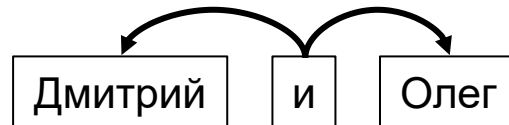
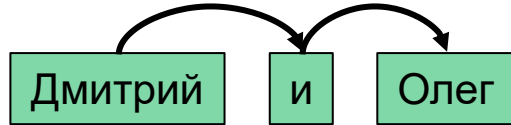


- Сложносочиненные предложения

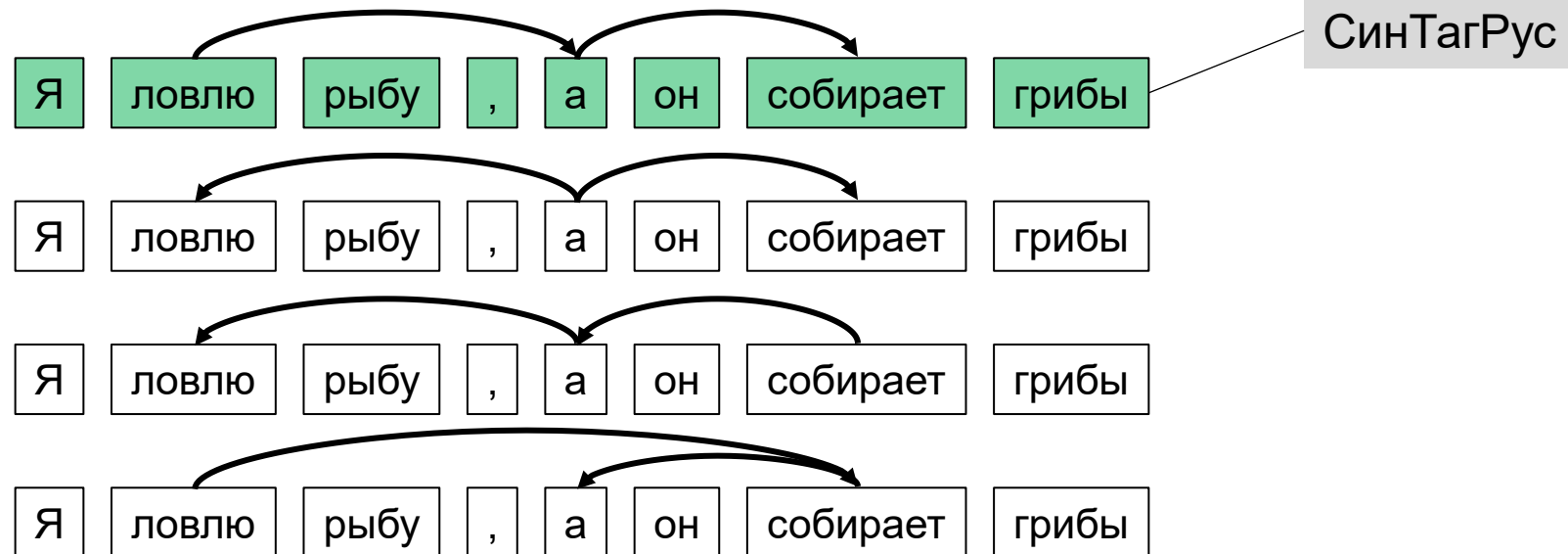


Грамматика зависимостей

- Не все синтаксические отношения подчинительные
 - Сочинительная группа

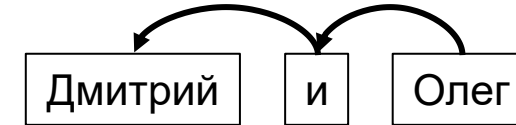
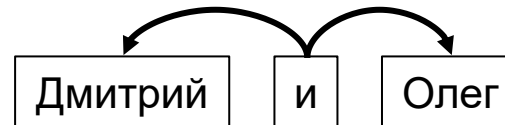
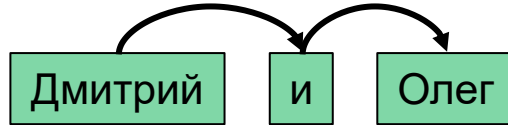


- Сложносочиненные предложения

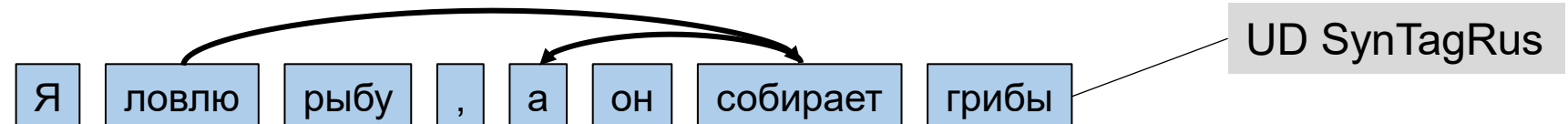
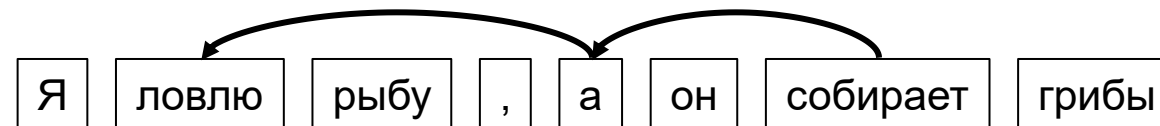
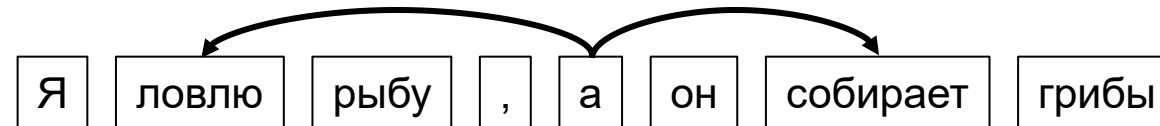
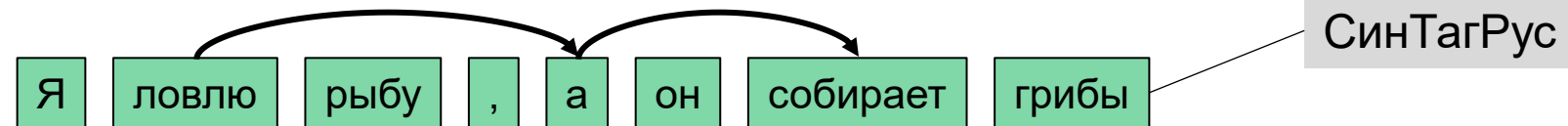


Грамматика зависимостей

- Не все синтаксические отношения подчинительные
 - Сочинительная группа



- Сложносочиненные предложения

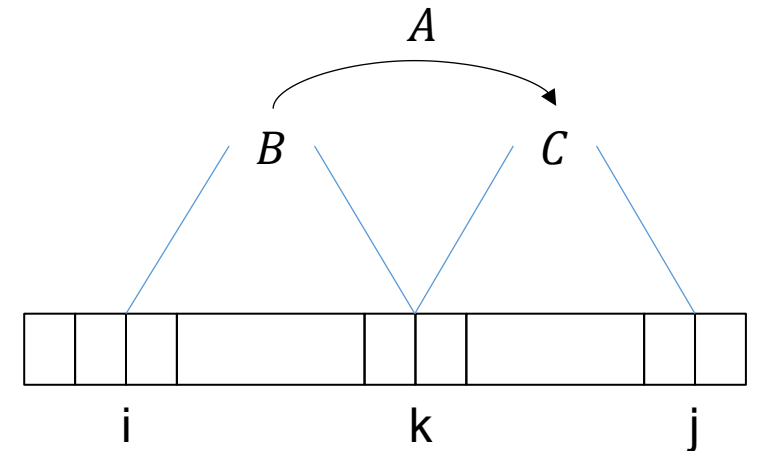


Universal Dependencies

- 141 языков
 - Универсальный набор грамматических категорий
 - Универсальный набор синтаксических отношений
- 245 наборов данных (CoNLL-U формат)
 - Часть размечена вручную
 - Часть сконвертирована из других форматов

Методы динамического программирования

- Некоторое обобщение алгоритма СКУ для грамматик зависимостей
 - Строится дерево разбора предложения снизу-вверх
 - На каждом этапе рассматриваются подстроки исходной строки
 - Если подстрока состоит из двух деревьев, оценивается левая и правая дуга между ними:
 - $score(A) = score(B) + score(C) + score(arc)$
- Варианты
 - Алгоритм Коллинса. Сложность $O(n^5)$
 - Алгоритм Эйснера. Сложность $O(n^3)$



Transition-based parsing

- Система переходов состоит из
 - C – множество конфигураций
 - T – множество переходов. $t: C \rightarrow C$
 - c_s – функция инициализации
 - $C_t \subseteq C$ – множество конечных конфигураций
- Конфигурация состоит из:
 - Σ – стек
 - B – буфер
 - A – множество зависимостей (i, l, j)
- Последовательность переходов для последовательности x :
 - $c_0 = c_s(x)$
 - $c_i = t(c_{i-1}), i = \overline{1..m}$
 - $c_m \in C_t$

Transition-based parsing

- Алгоритм
 - Получить начальную конфигурацию $c = c_s(x)$
 - Пока $c \notin C_t$
 - Выбрать переход $t = \underset{t}{\operatorname{argmax}} \operatorname{Score}(c, t)$
 - Выполнить переход $c = t(c)$
 - Извлечь множество зависимостей из $c.A$

Arc-standard

- Инициализация

- $c_s(x = x_1 \dots x_n) = ([0], [1, \dots, n], \emptyset)$

- Конечное состояние

- $C_t = \{c \in C \mid c = ([0], [], A)\}$

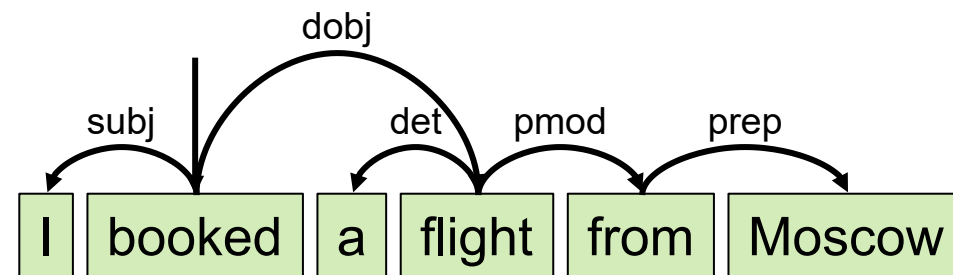
- Переходы

- $(Shift) \quad (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

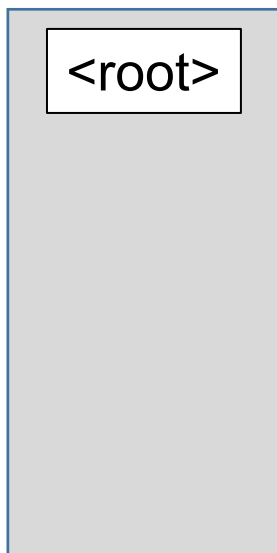
- $(LeftArc_l) \quad ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\}), \text{ если } i \neq 0$

- $(RightArc_l) \quad ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard



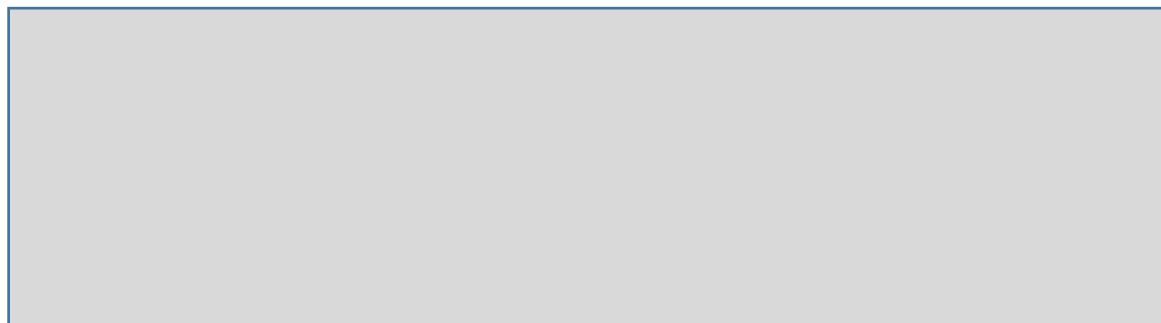
Стек



Буфер



Зависимости



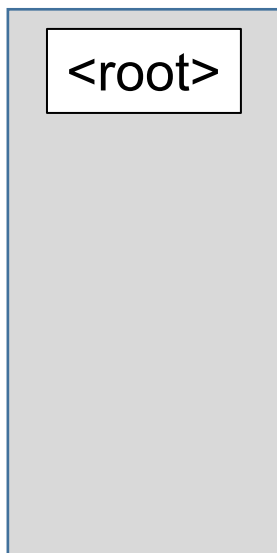
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

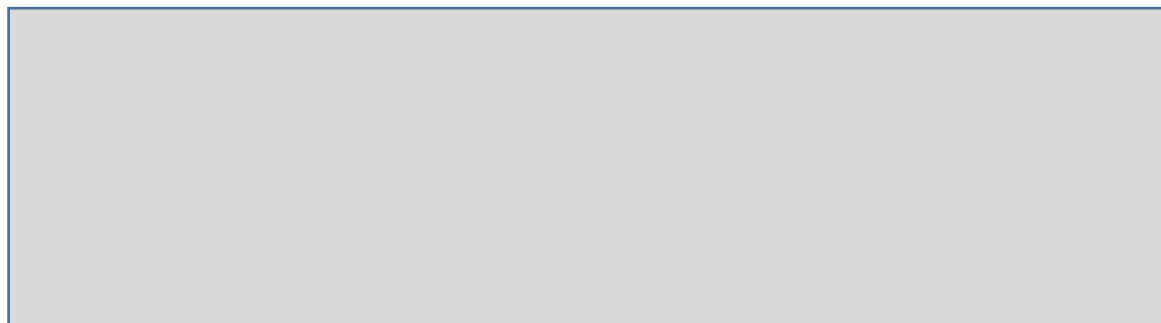
Стек



Буфер



Зависимости



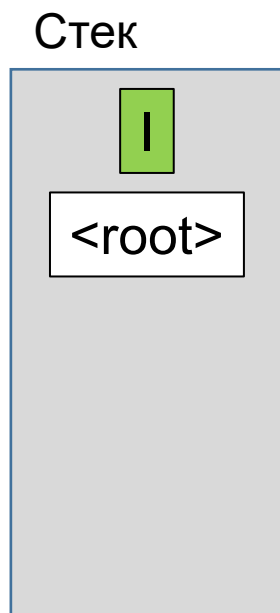
Shift

$$\textit{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

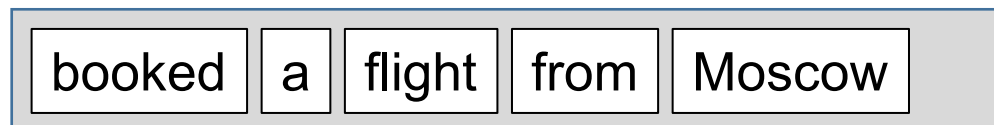
$$\textit{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

$$\textit{RightArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$

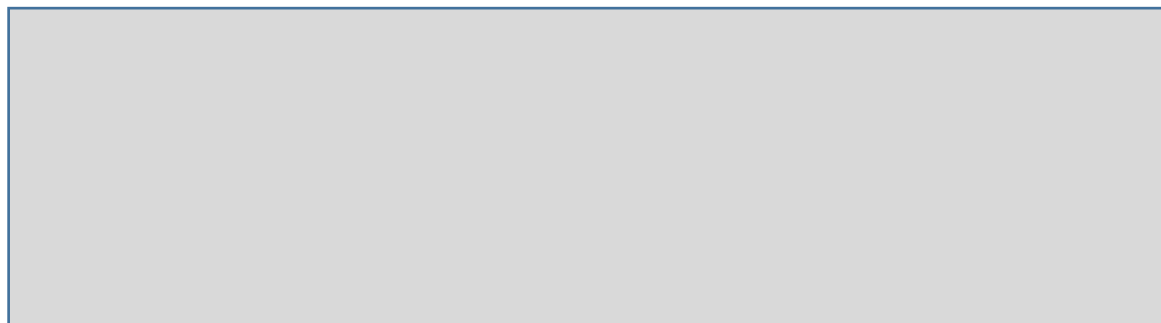
Arc-standard



Буфер



Зависимости



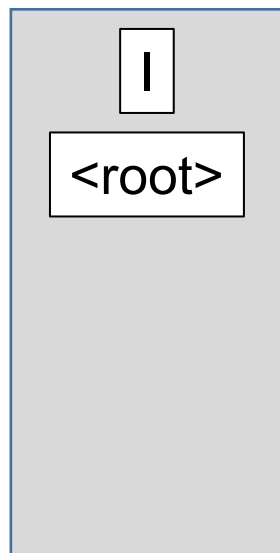
$$\text{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

$$\text{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

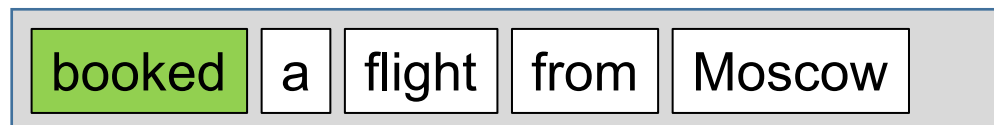
$$\text{RightArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$

Arc-standard

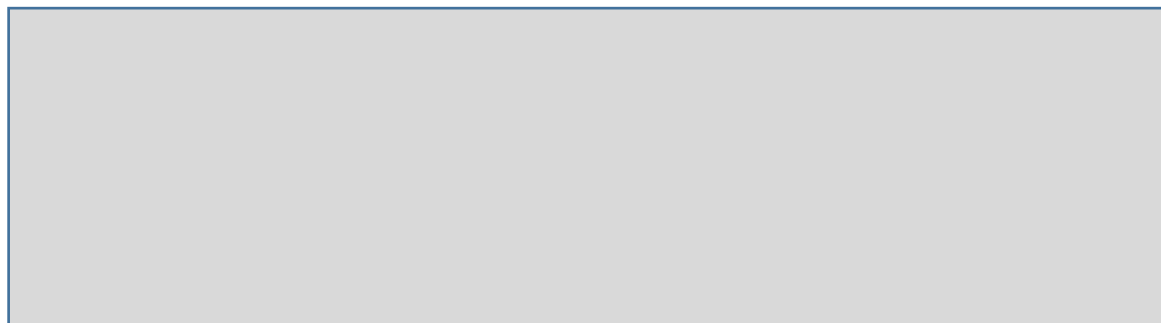
Стек



Буфер



Зависимости



$$\text{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

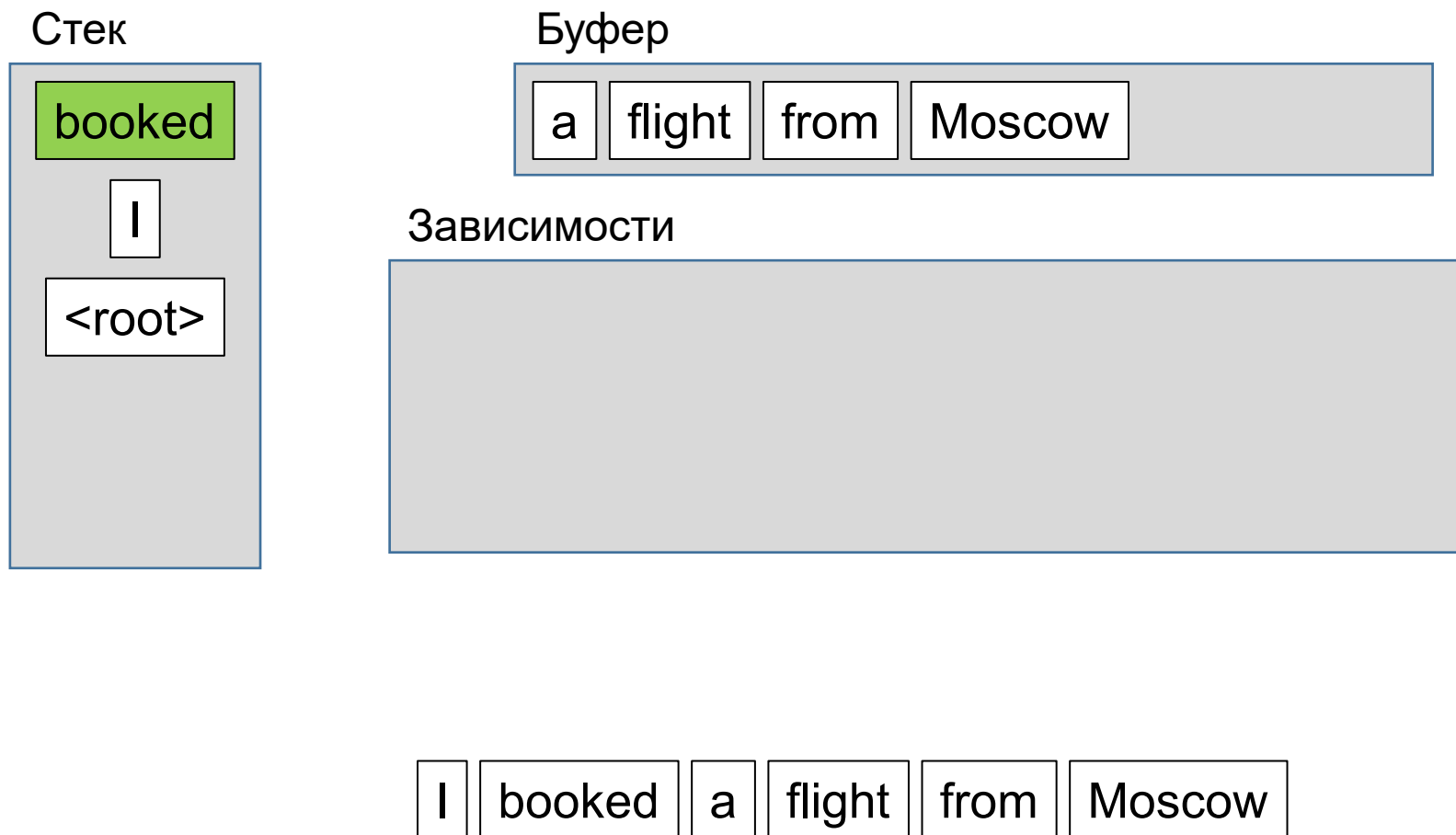
$$\text{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

$$\text{RightArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$

Shift



Arc-standard



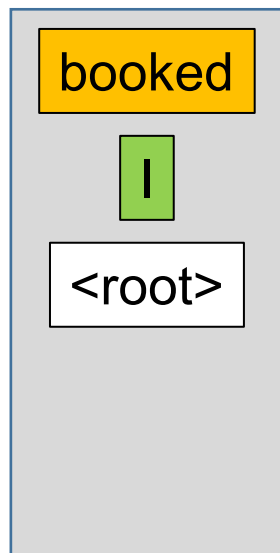
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

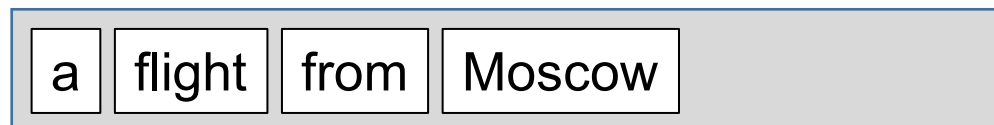
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

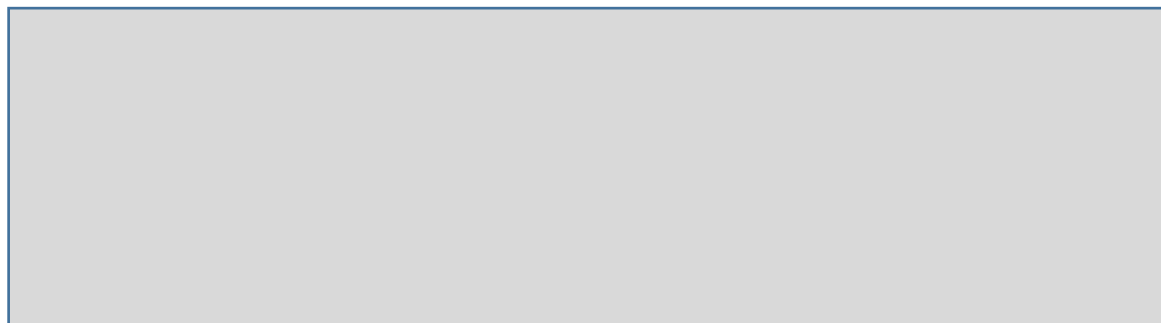
Стек



Буфер



Зависимости



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

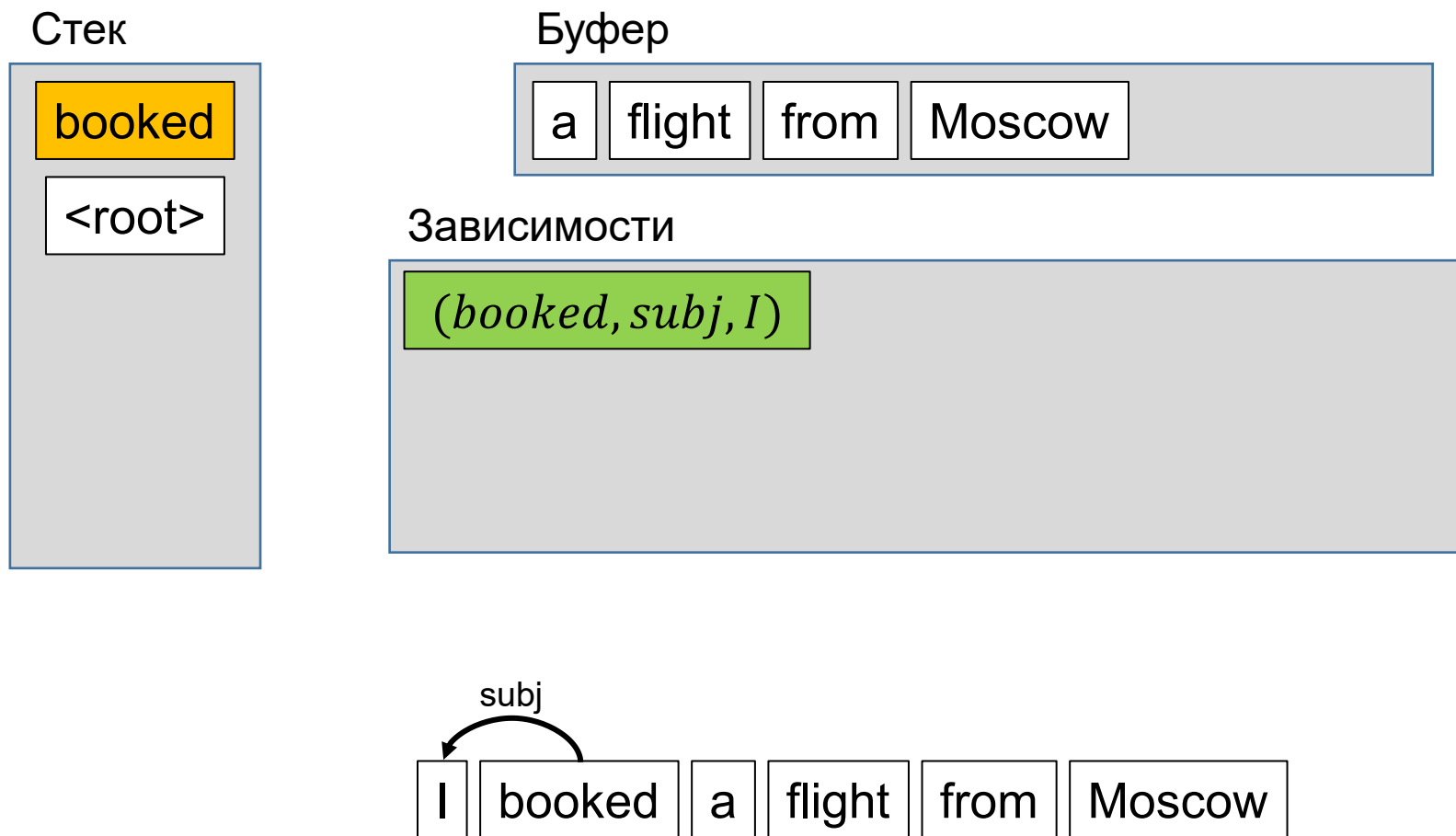
LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$



LeftArc_{subj}

Arc-standard



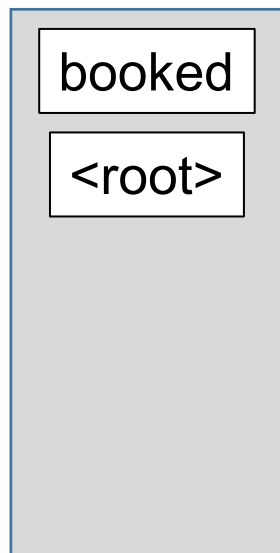
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

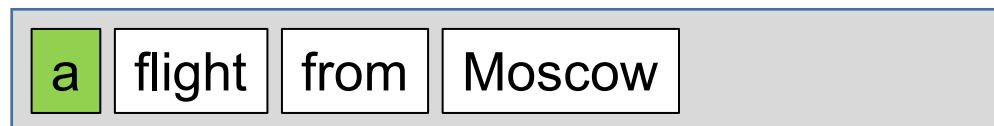
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

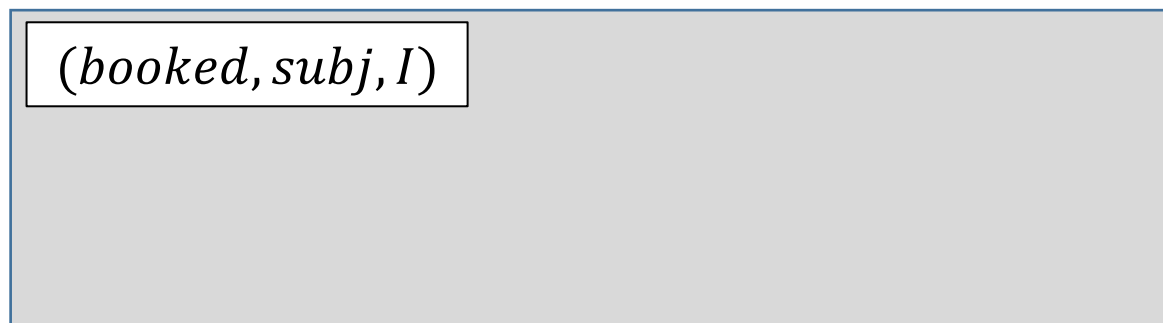
Стек



Буфер



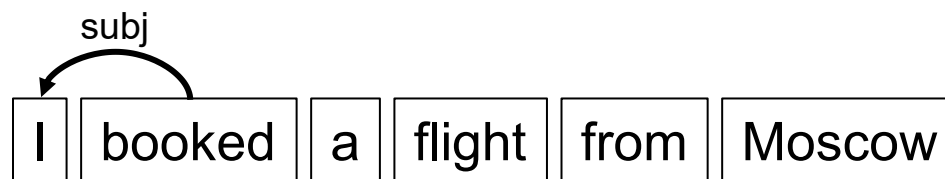
Зависимости



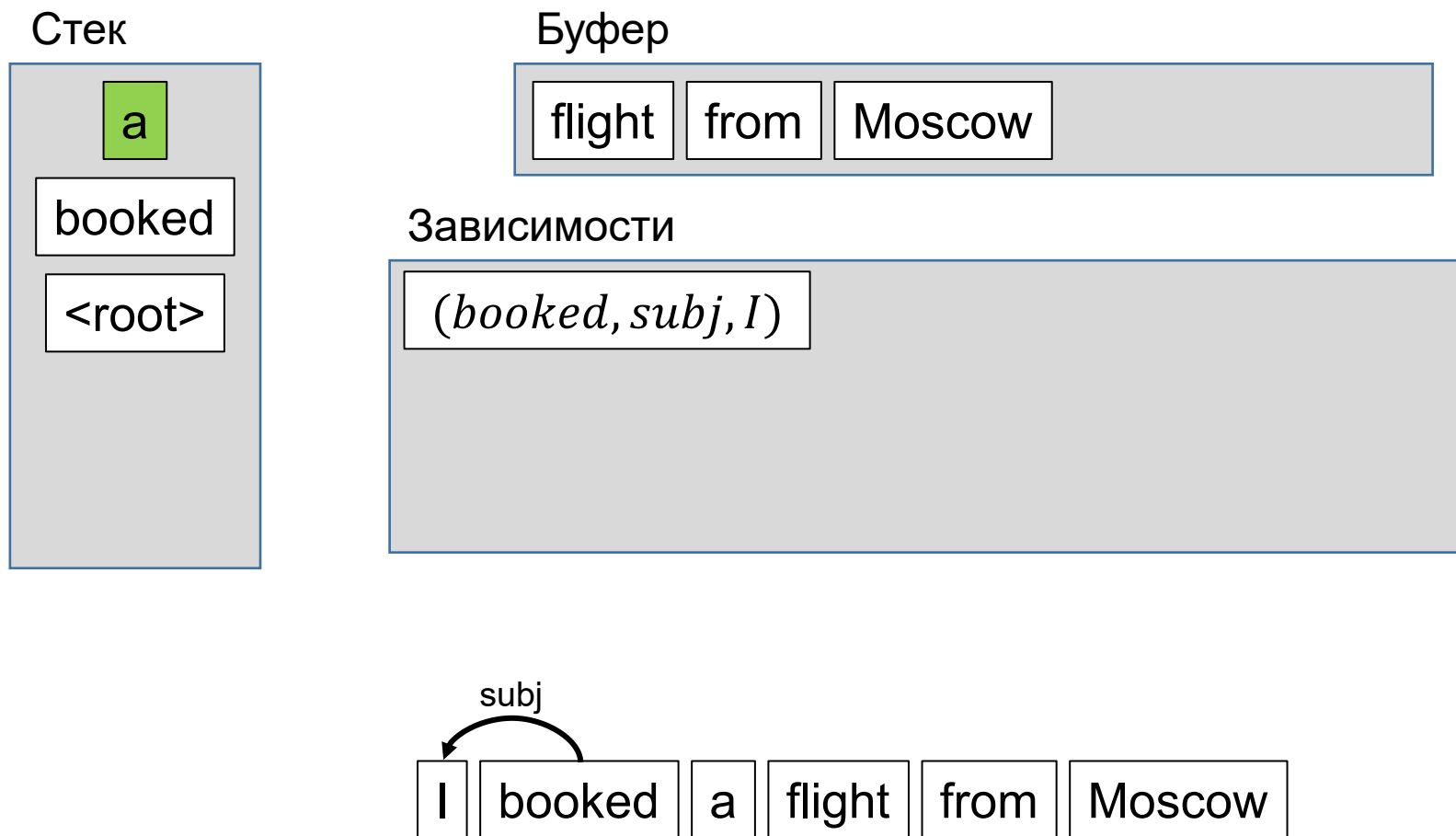
$$\textit{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

$$\textit{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

$$\textit{RightArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$



Arc-standard

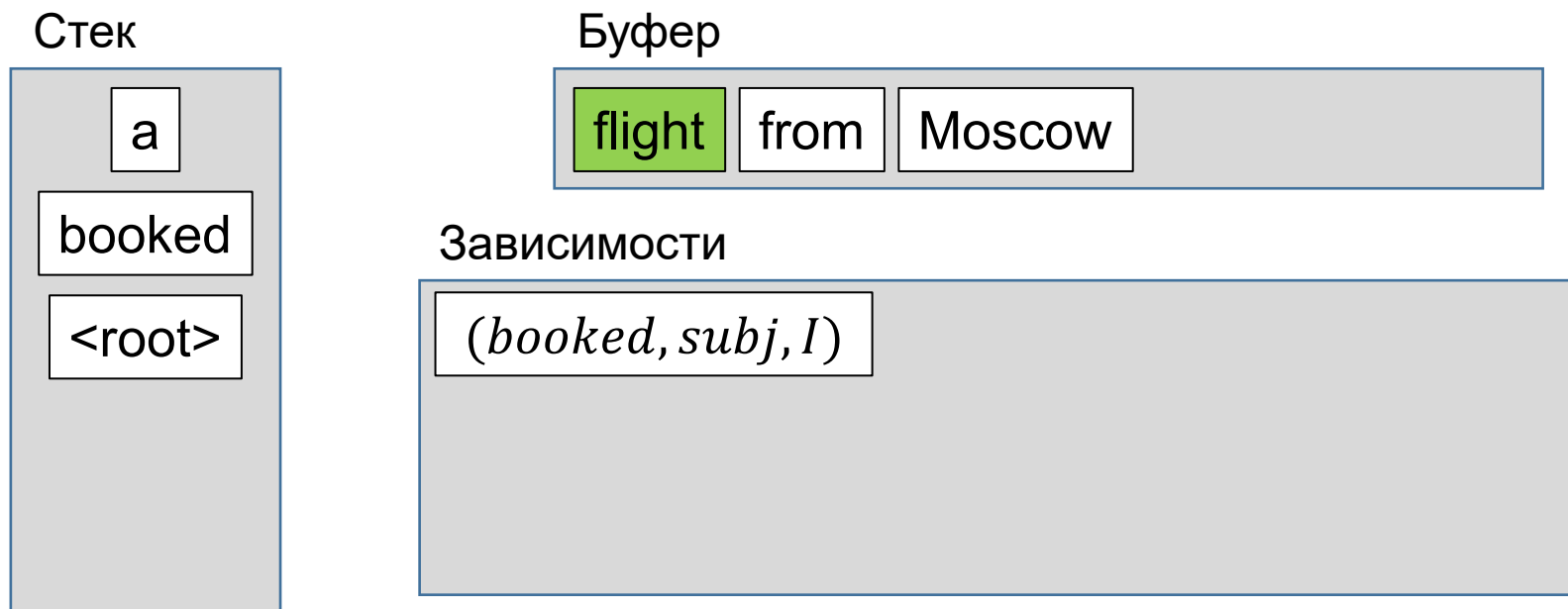


Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

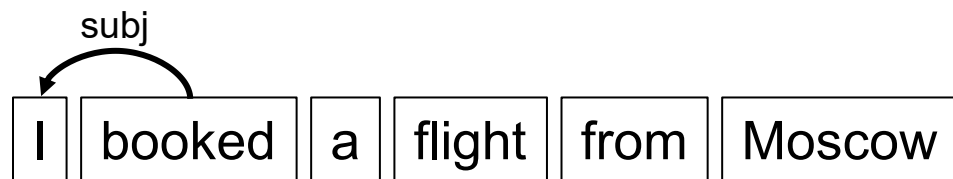
Arc-standard



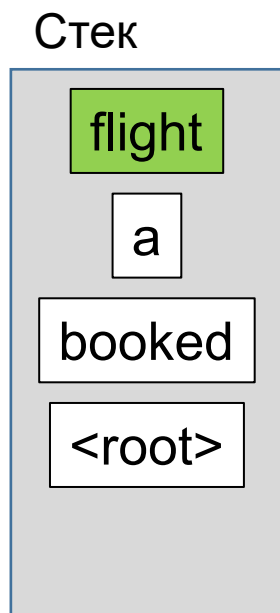
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

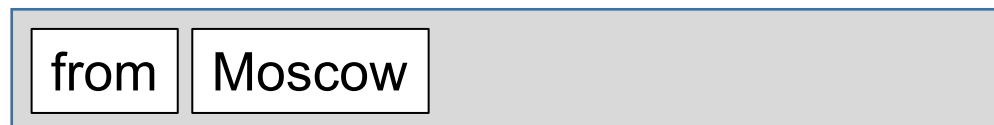
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$



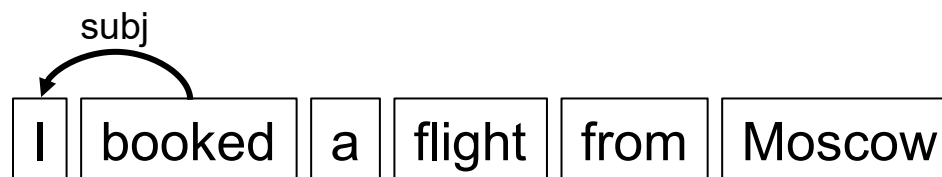
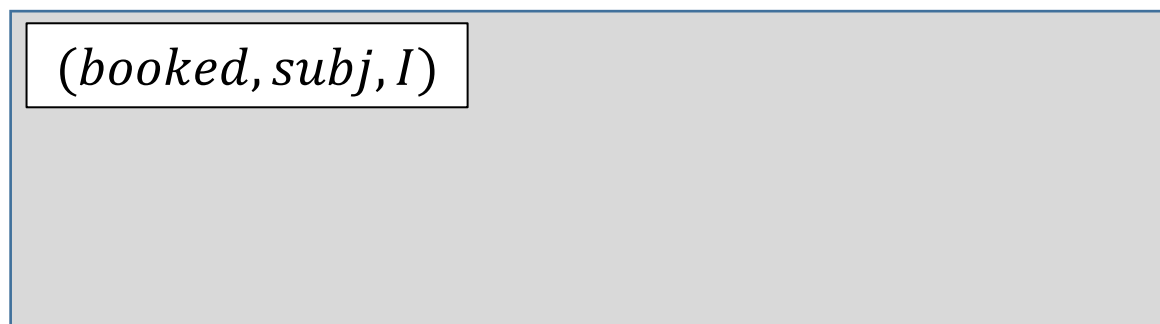
Arc-standard



Буфер



Зависимости



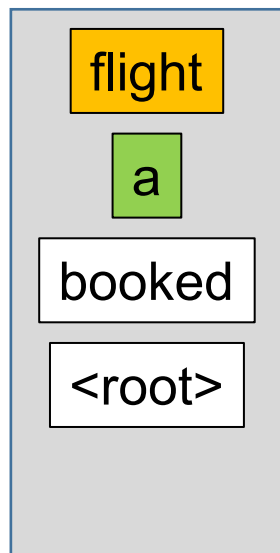
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

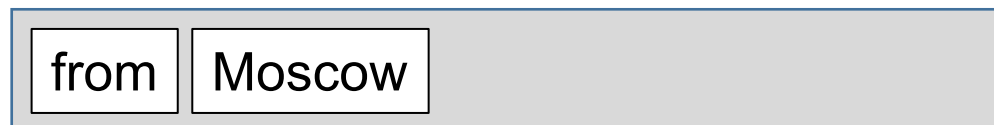
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

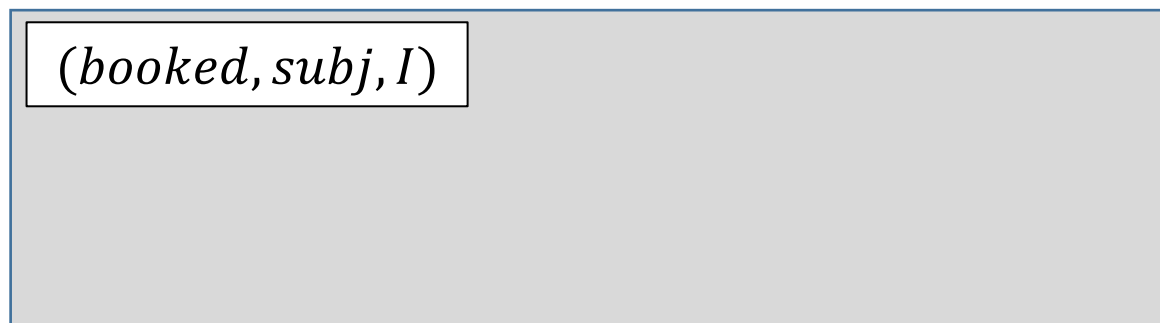
Стек



Буфер



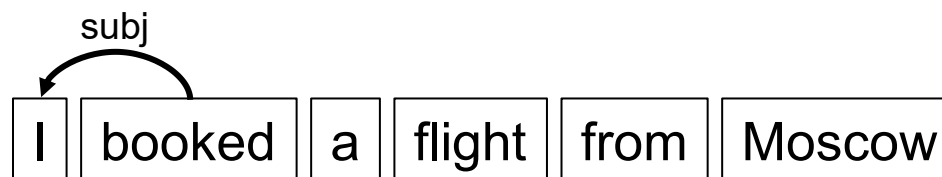
Зависимости



$$\text{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

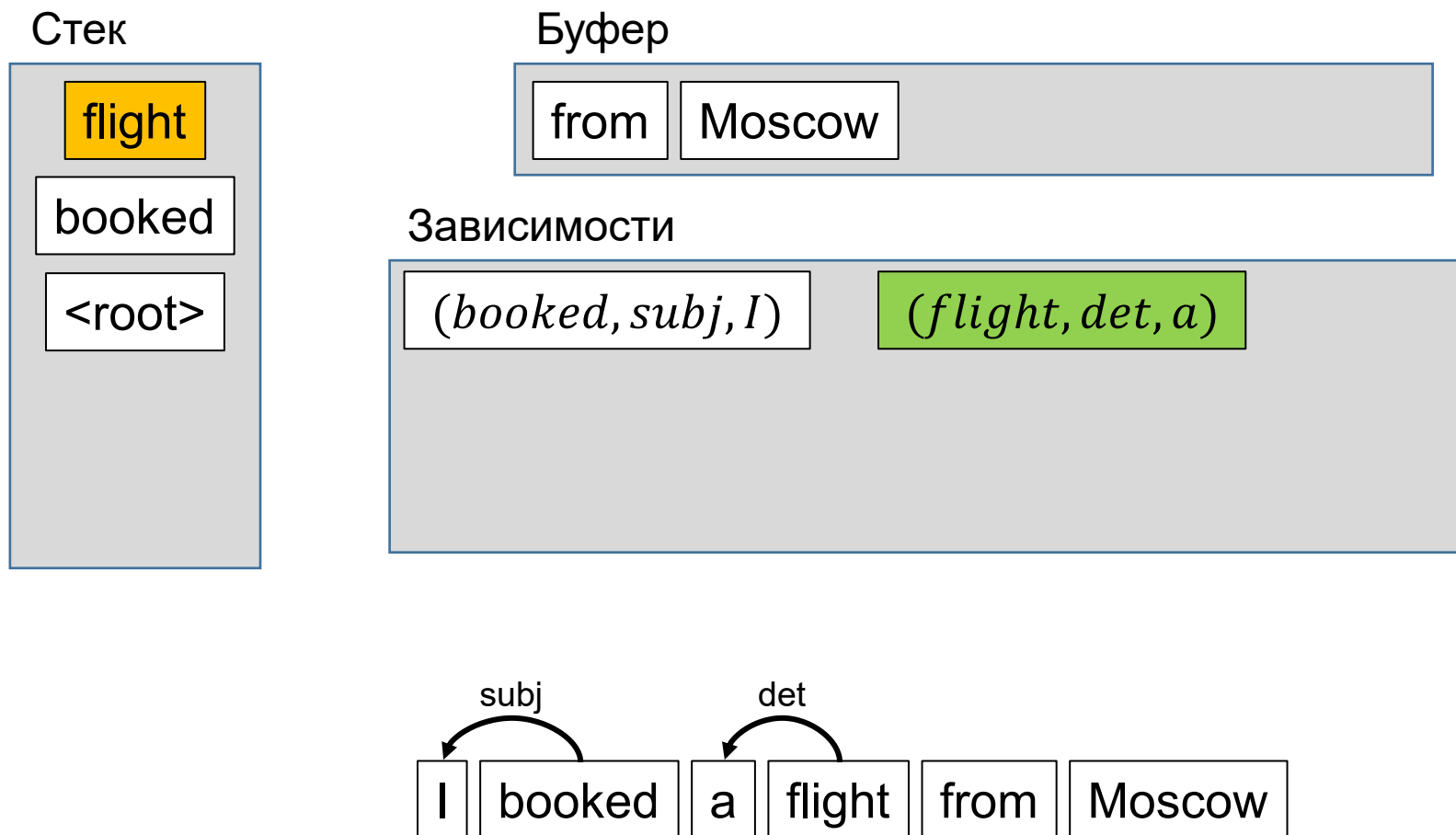
$$\text{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

$$\text{RightArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$



LeftArc_{det}

Arc-standard



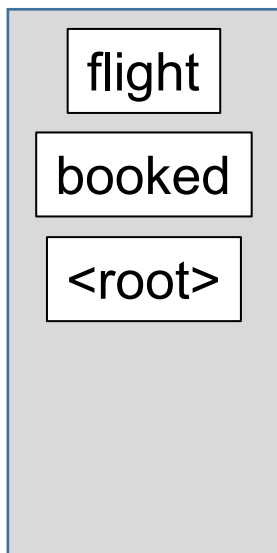
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

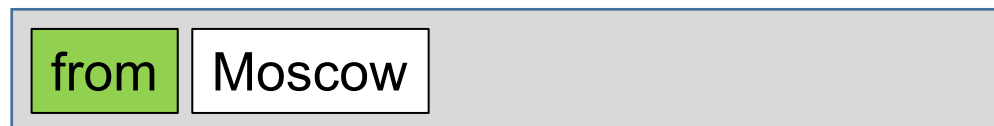
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

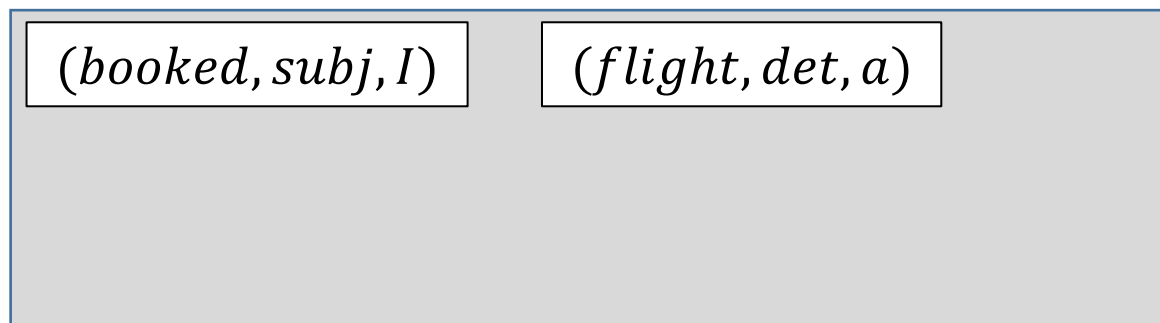
Стек



Буфер



Зависимости



Shift

$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

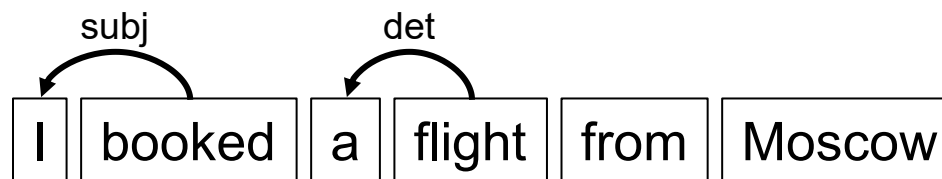
LeftArc_l

$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

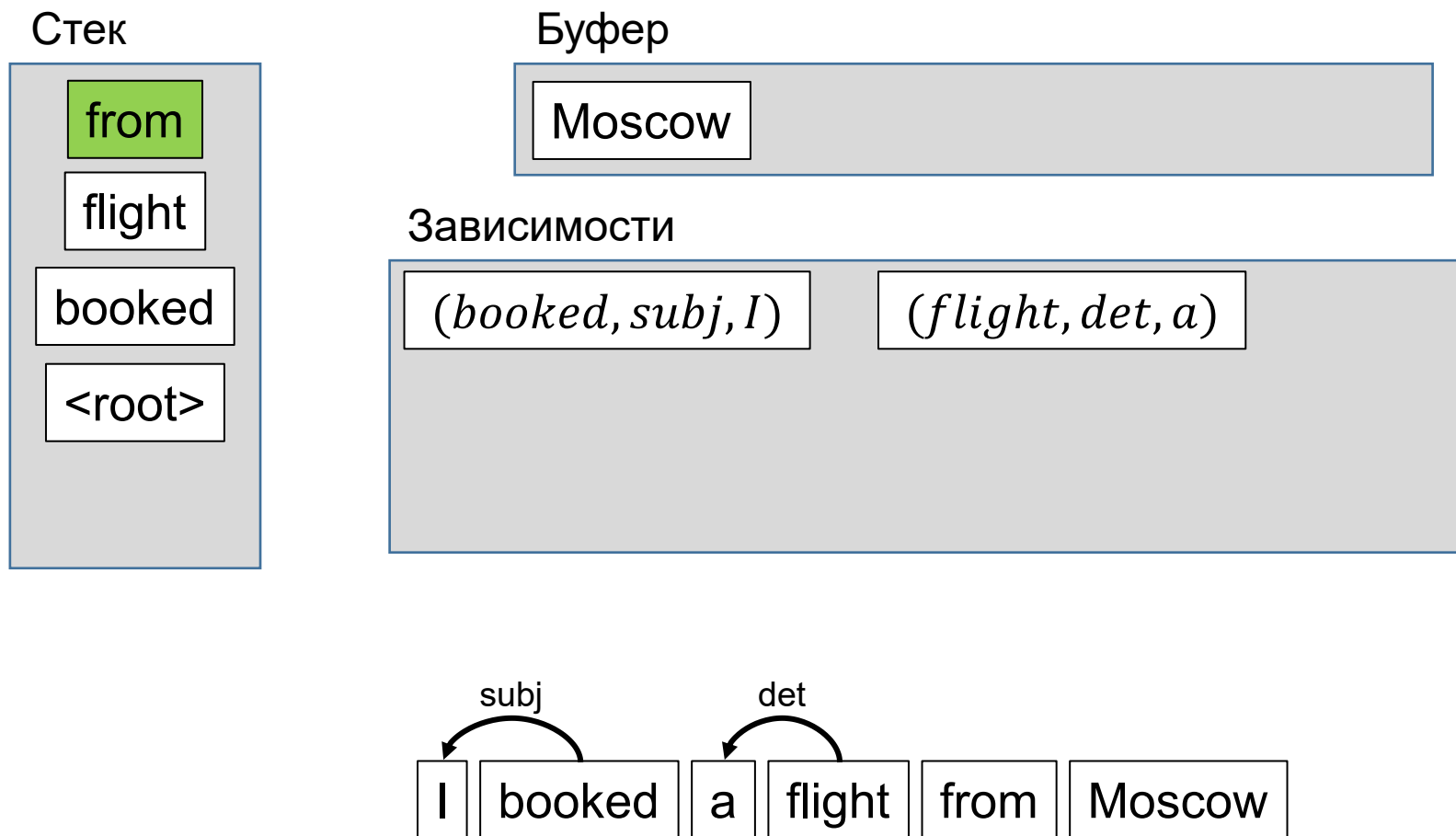
RightArc_l

$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Shift



Arc-standard

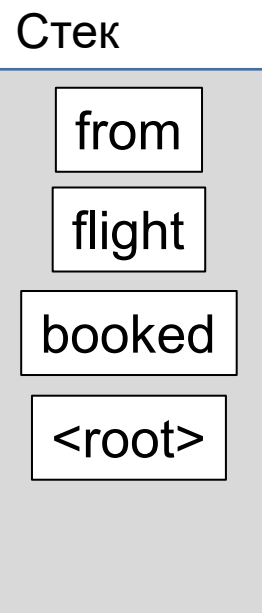


Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

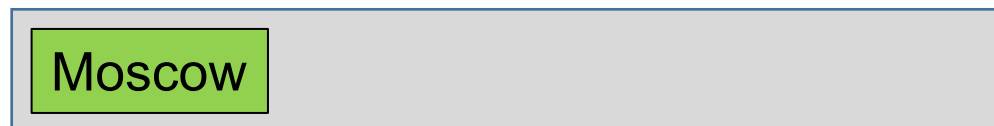
LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

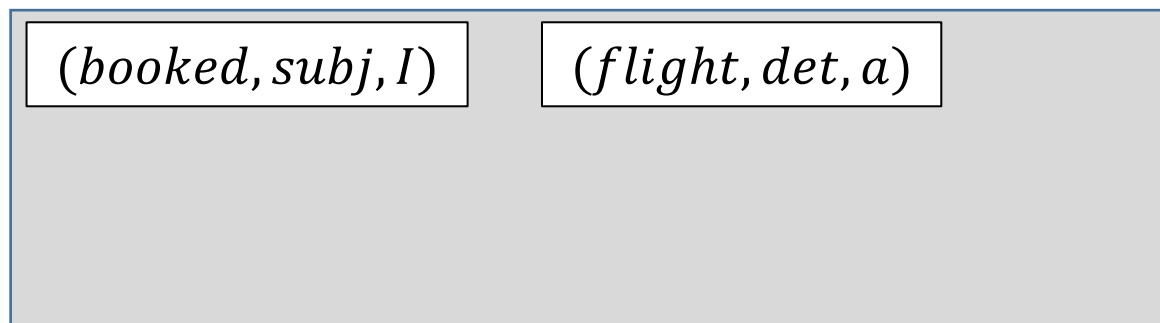
Arc-standard



Буфер



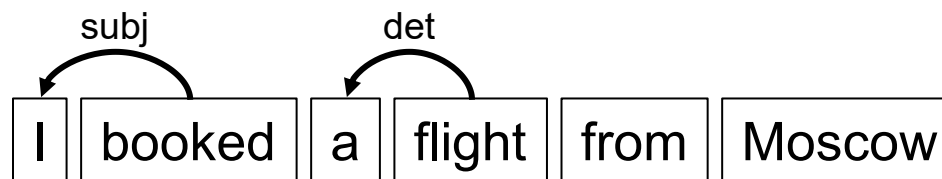
Зависимости



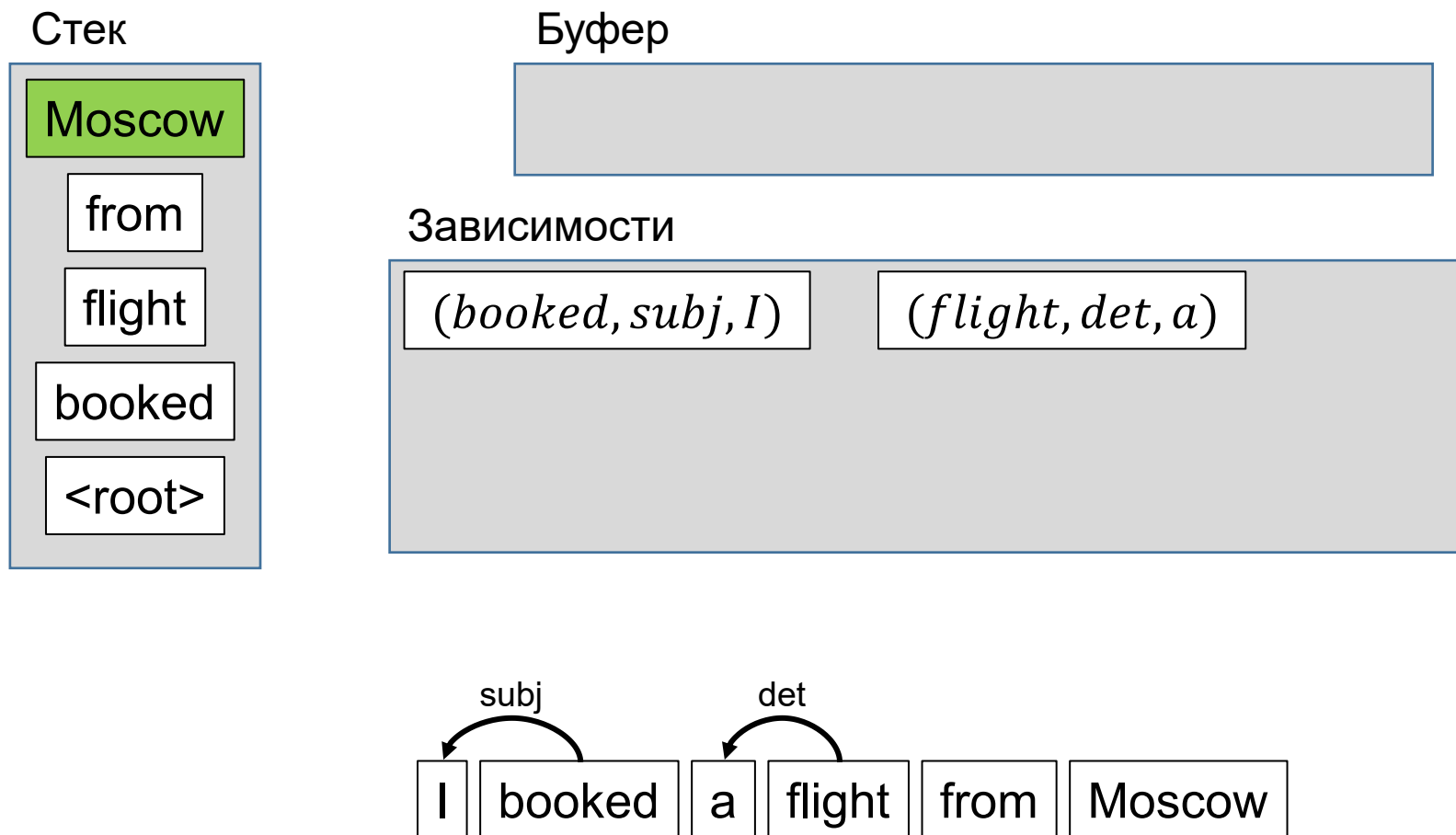
$$\textit{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

$$\textit{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

$$\textit{RightArc}_l \\ ([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$



Arc-standard

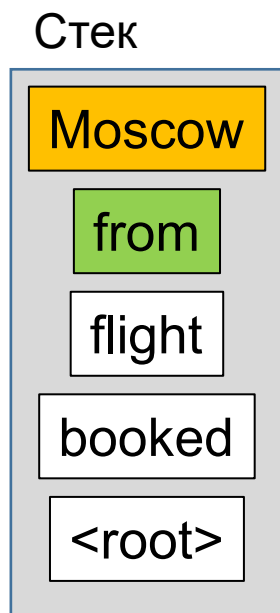


Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

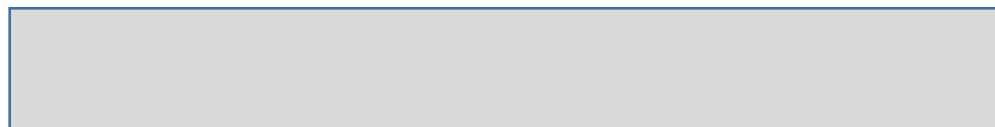
LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

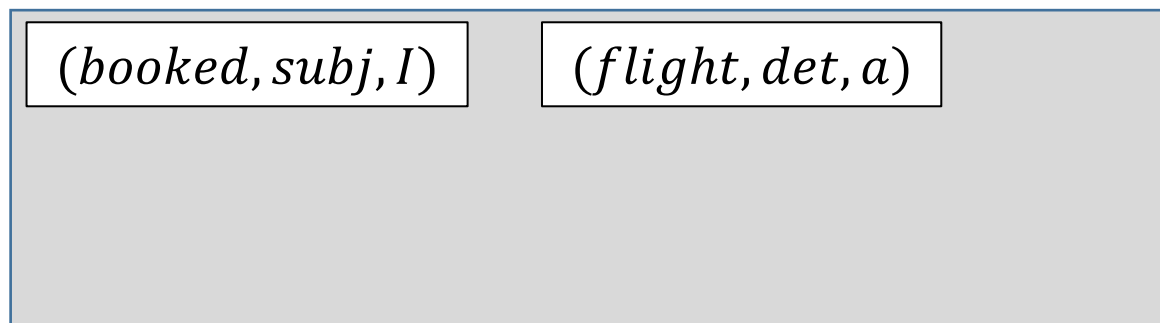
Arc-standard



Буфер



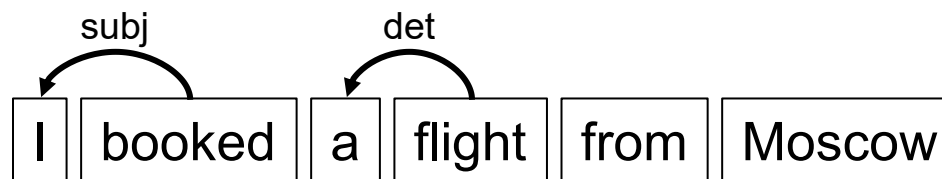
ЗАВИСИМОСТИ



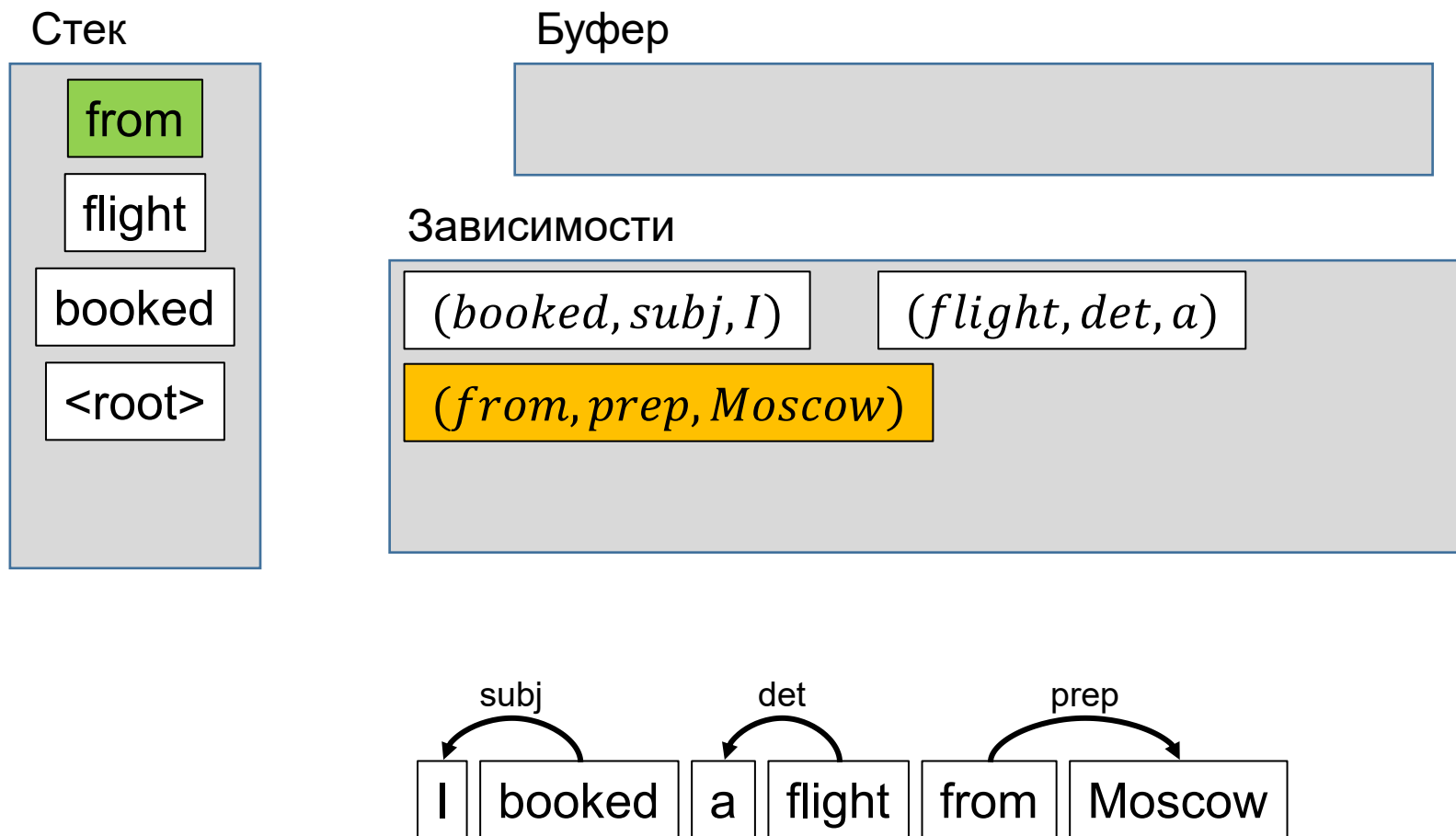
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$



Arc-standard



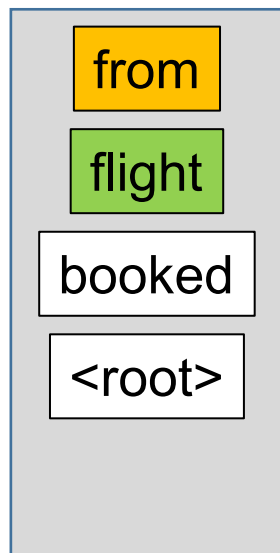
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

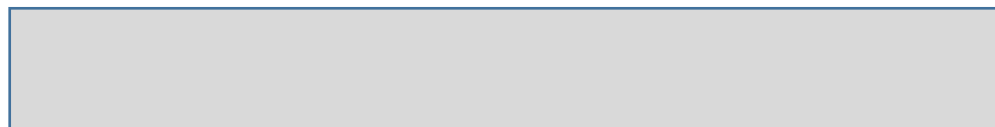
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

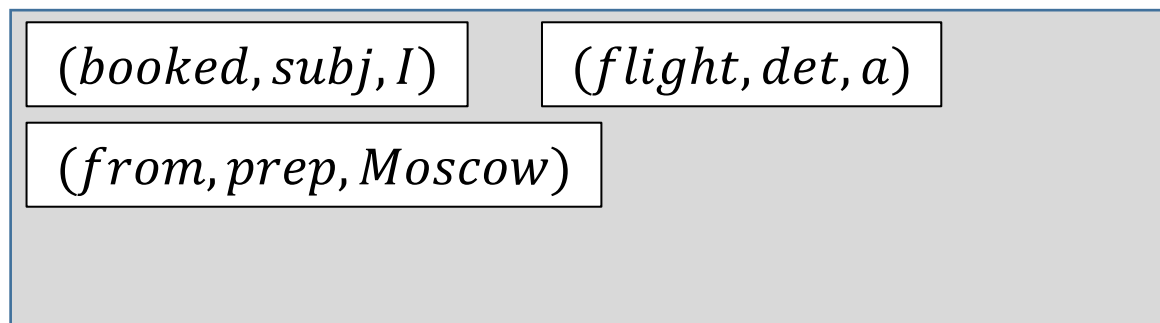
Стек



Буфер



Зависимости



Shift

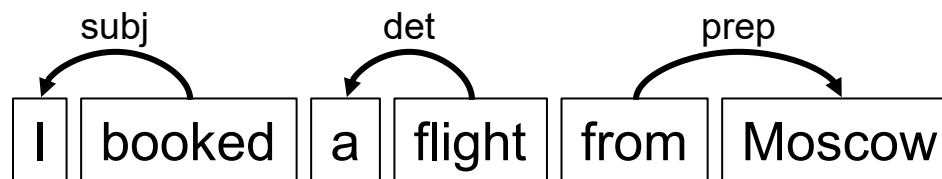
$$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

LeftArc_l

$$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

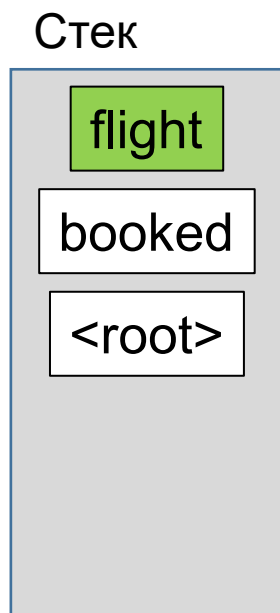
RightArc_l

$$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$

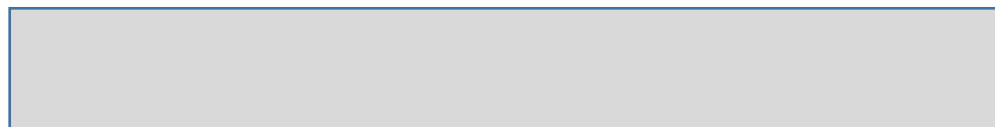


RightArc_{pmod}

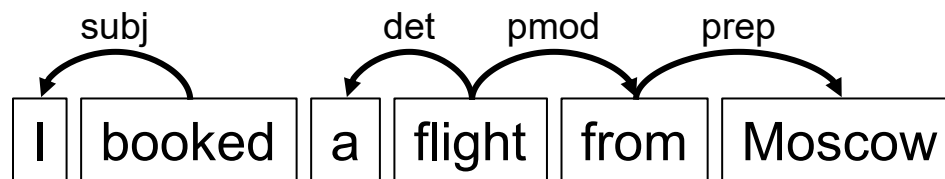
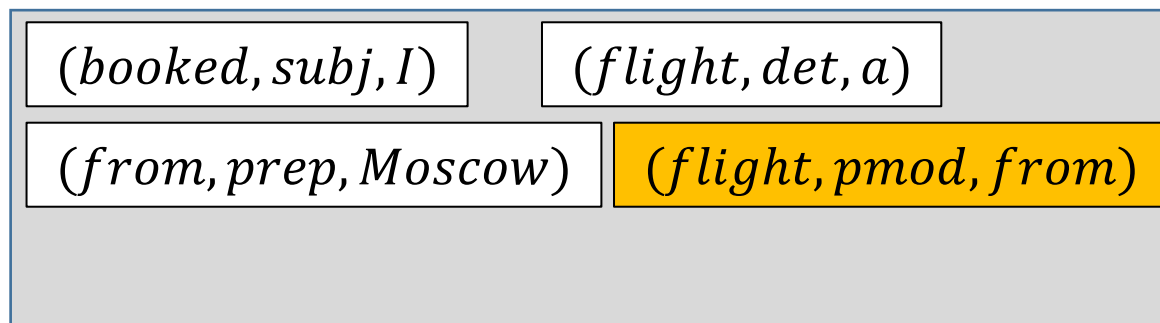
Arc-standard



Буфер



Зависимости



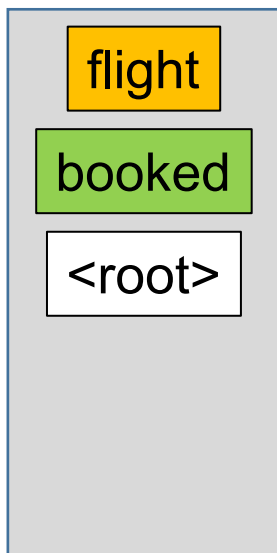
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

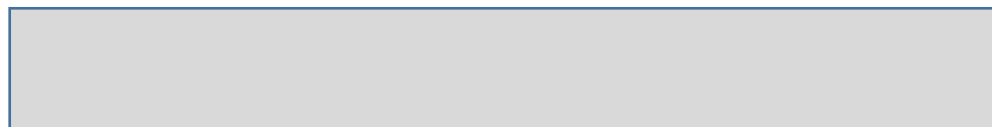
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

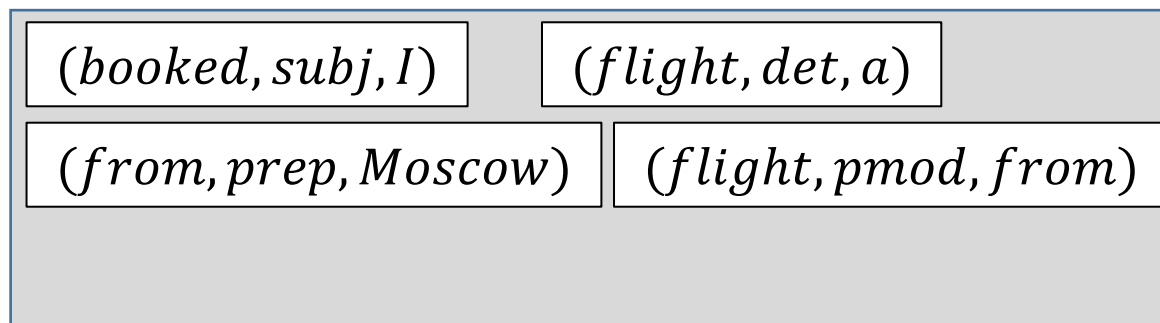
Стек



Буфер



Зависимости



Shift

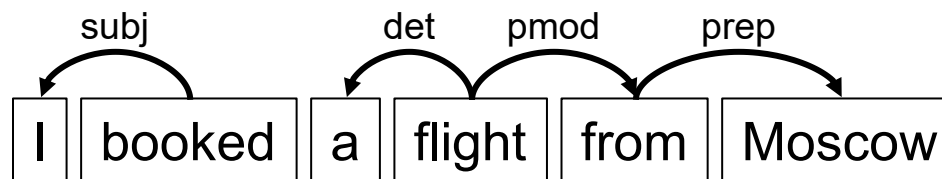
$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l

$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

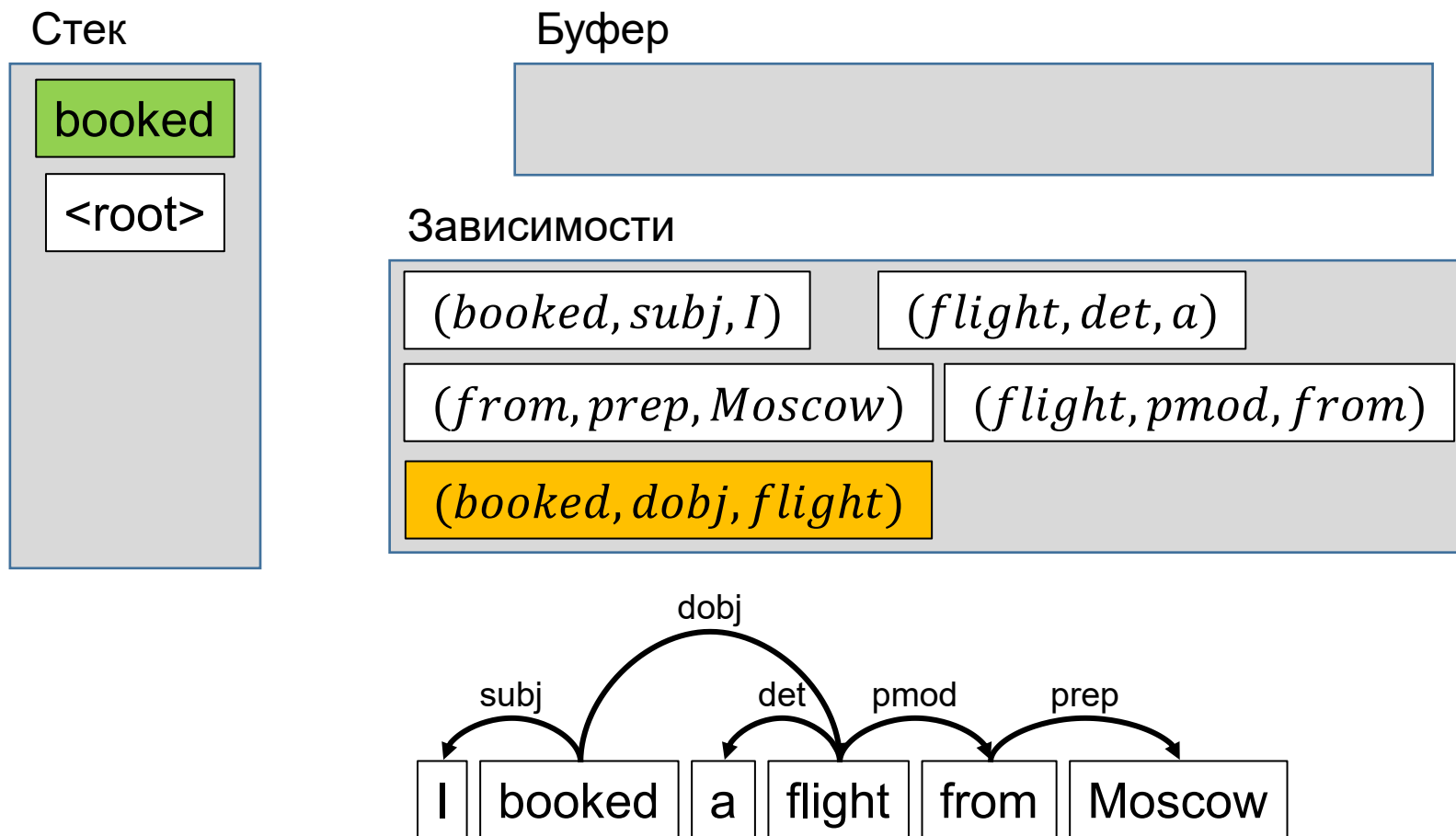
RightArc_l

$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$



RightArc_{dobj}

Arc-standard



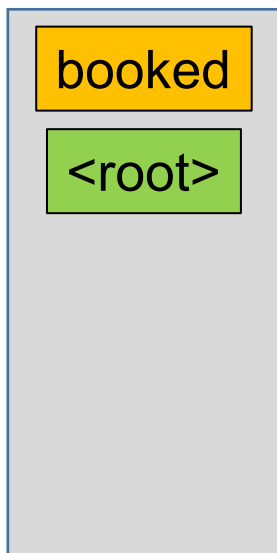
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

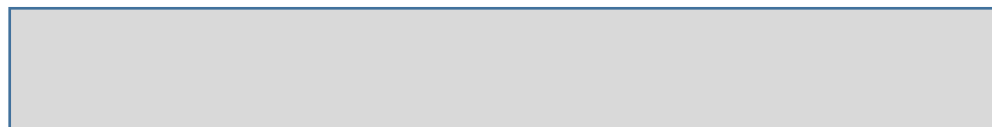
RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

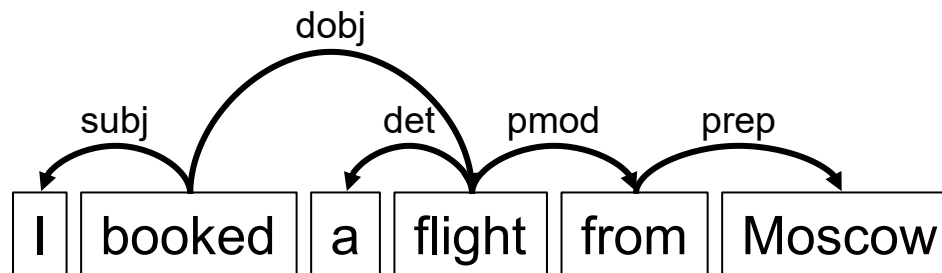
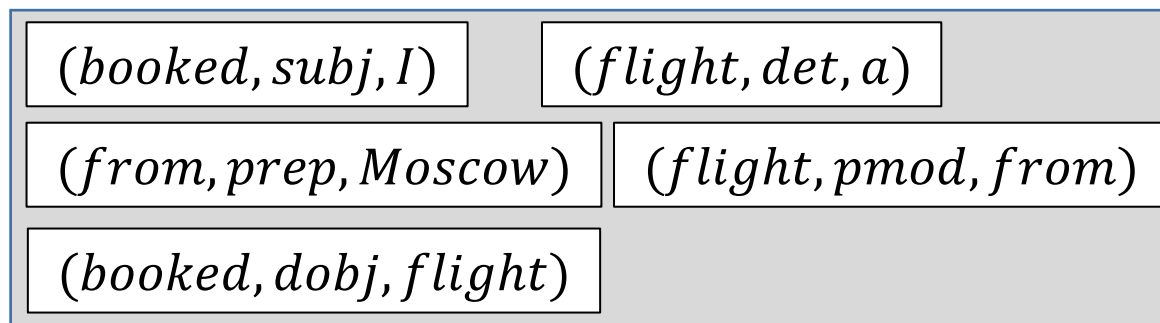
Стек



Буфер



Зависимости



Shift

$$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

LeftArc_l

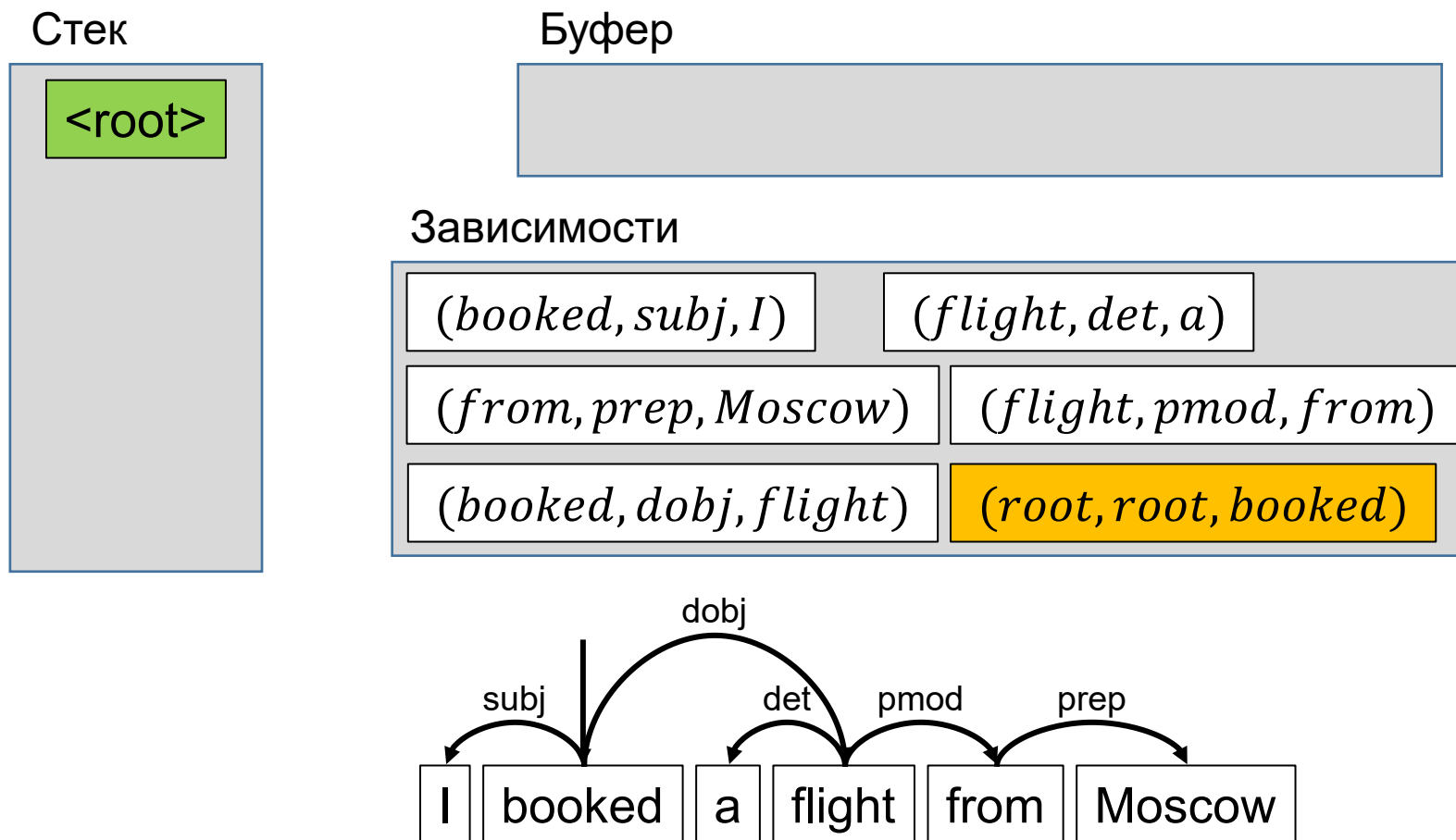
$$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$$

RightArc_l

$$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$$

RightArc_{root}

Arc-standard



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-standard

Стек

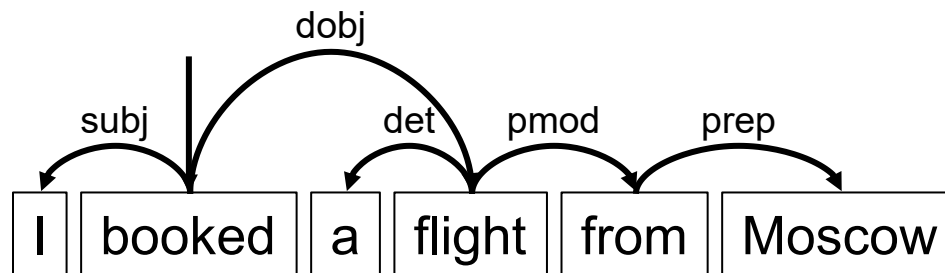
<root>

Буфер



ЗАВИСИМОСТИ

$(booked, subj, I)$	$(flight, det, a)$
$(from, prep, Moscow)$	$(flight, pmod, from)$
$(booked, dobj, flight)$	$(root, root, booked)$



DONE!!!

Shift

$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l

$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l

$([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Arc-eager

- Инициализация

- $c_s(x = x_1 \dots x_n) = ([0], [1, \dots, n], \emptyset)$

- Конечное состояние

- $C_t = \{c \in C \mid c = (\Sigma, [], A)\}$

- Переходы

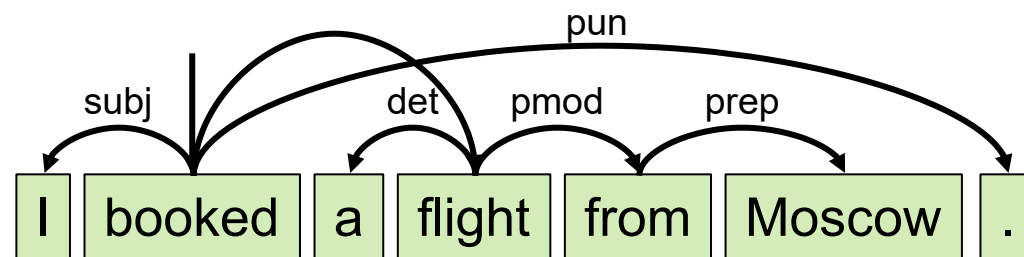
- $(Shift) \quad (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

- $(LeftArc_l) \quad ([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\}),$
если $i \neq 0$ и $\nexists k: (k, *, i) \in A$

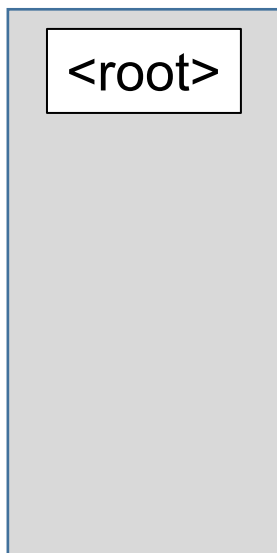
- $(RightArc_l) \quad ([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

- $(Reduce) \quad ([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$
если $\exists k: (k, *, i) \in A$

Arc-eager



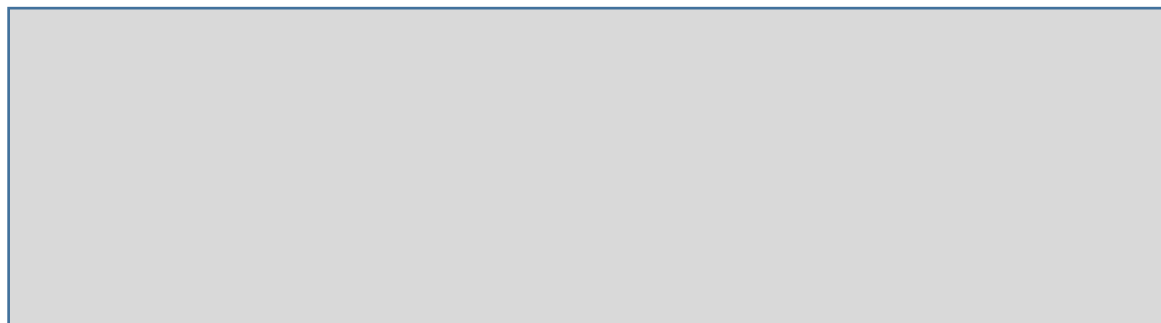
Стек



Буфер



Зависимости



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

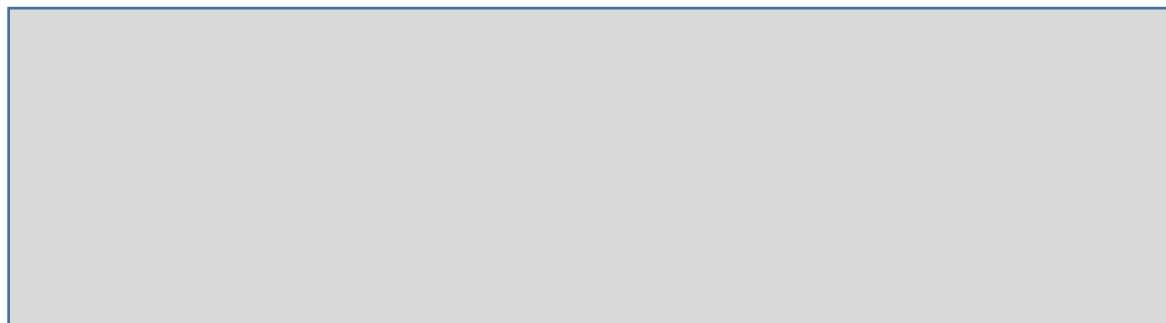
Стек

<root>

Буфер

I booked a flight from Moscow .

Зависимости



Shift

$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l

$([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l

$([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

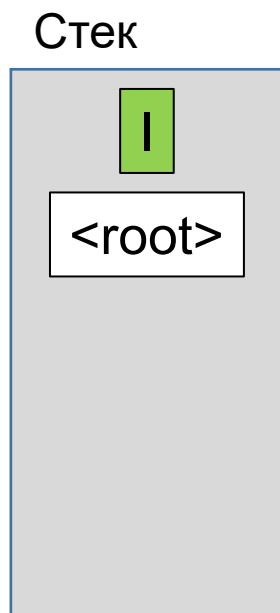
Reduce

$([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

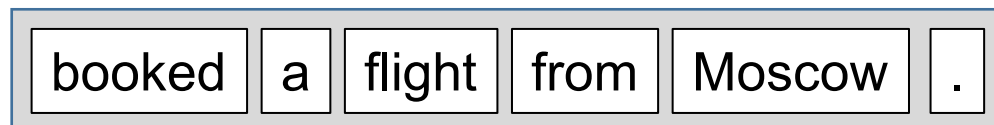
Shift

I booked a flight from Moscow .

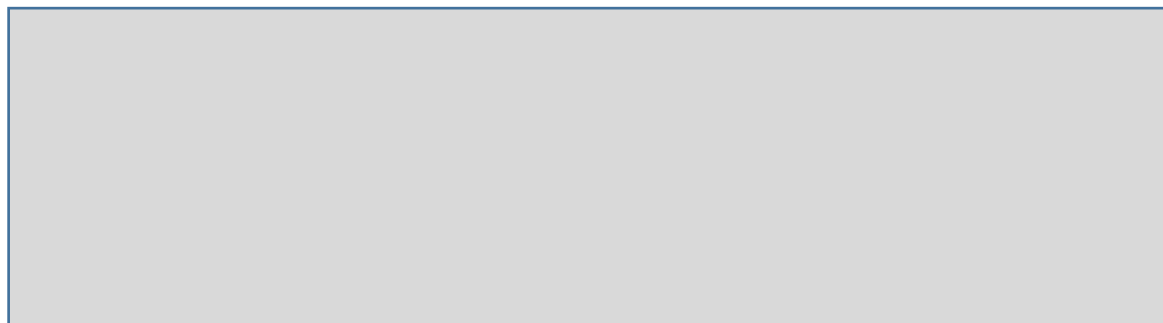
Arc-eager



Буфер



Зависимости



$$\textit{Shift}$$

$$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

$$\textit{LeftArc}_l$$

$$([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$$

$$\textit{RightArc}_l$$

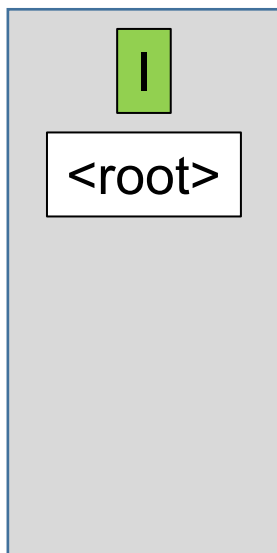
$$([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$$

$$\textit{Reduce}$$

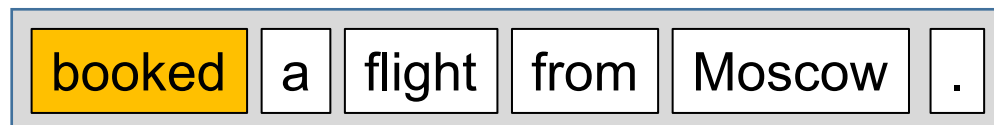
$$([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$$

Arc-eager

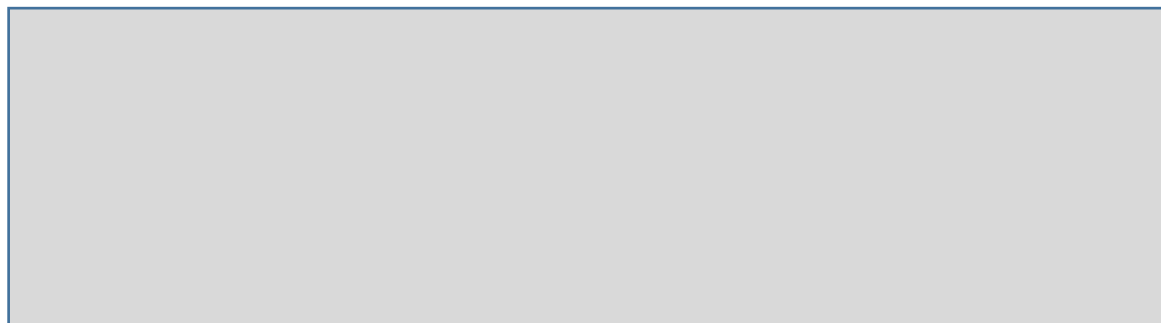
Стек



Буфер



Зависимости



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

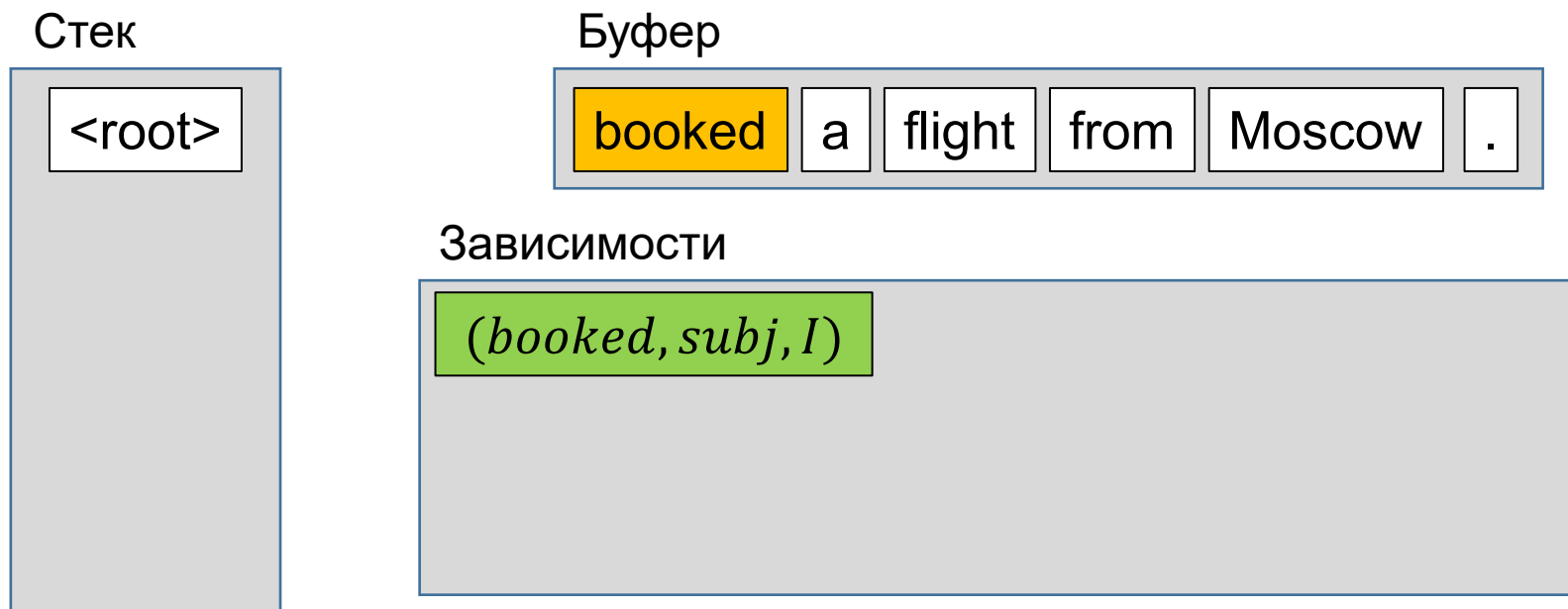
RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$



LeftArc_{subj}

Arc-eager



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

Стек

<root>

Буфер

booked a flight from Moscow .

Зависимости

(booked, subj, I)

subj

I booked a flight from Moscow .

RightArc_{root}

Shift

$(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l

$([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

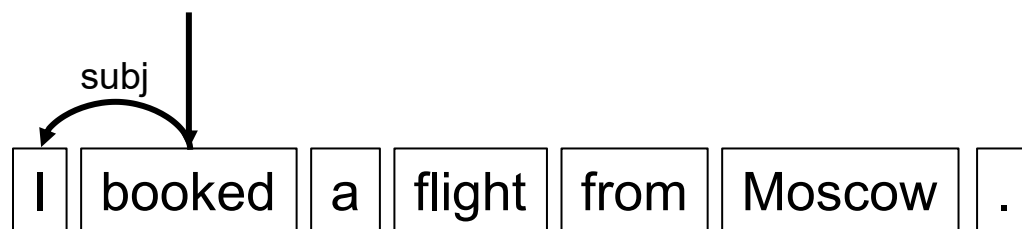
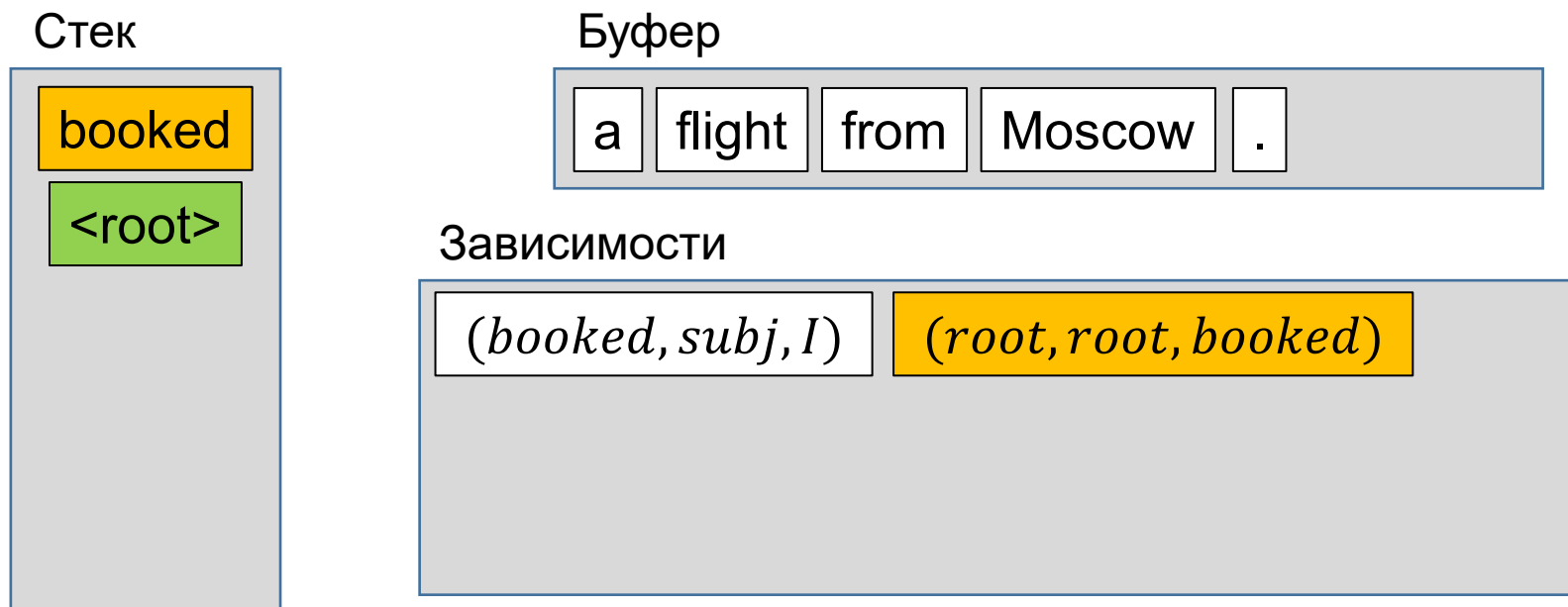
RightArc_l

$([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce

$([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager



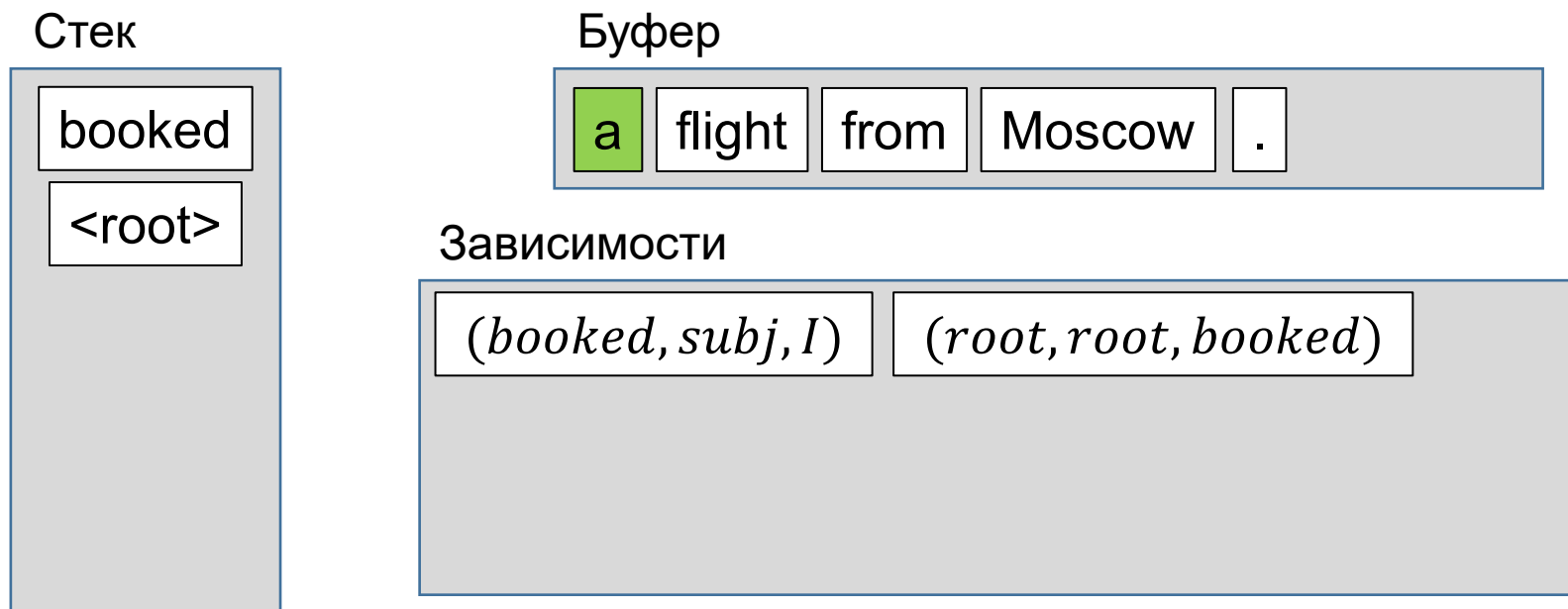
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

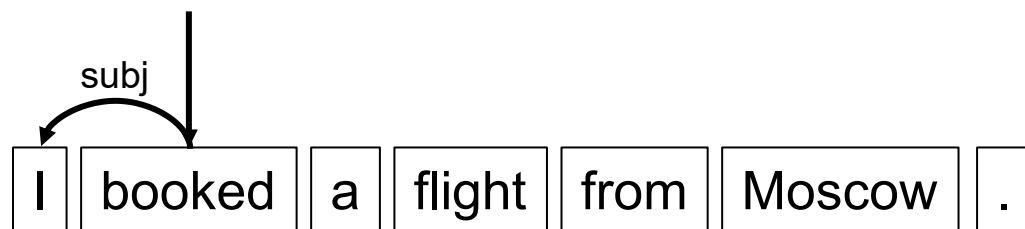


Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

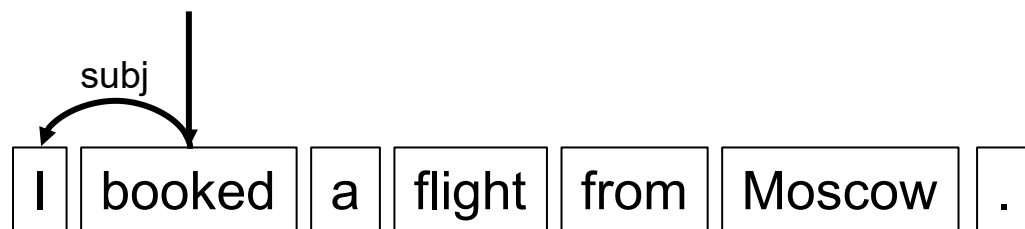
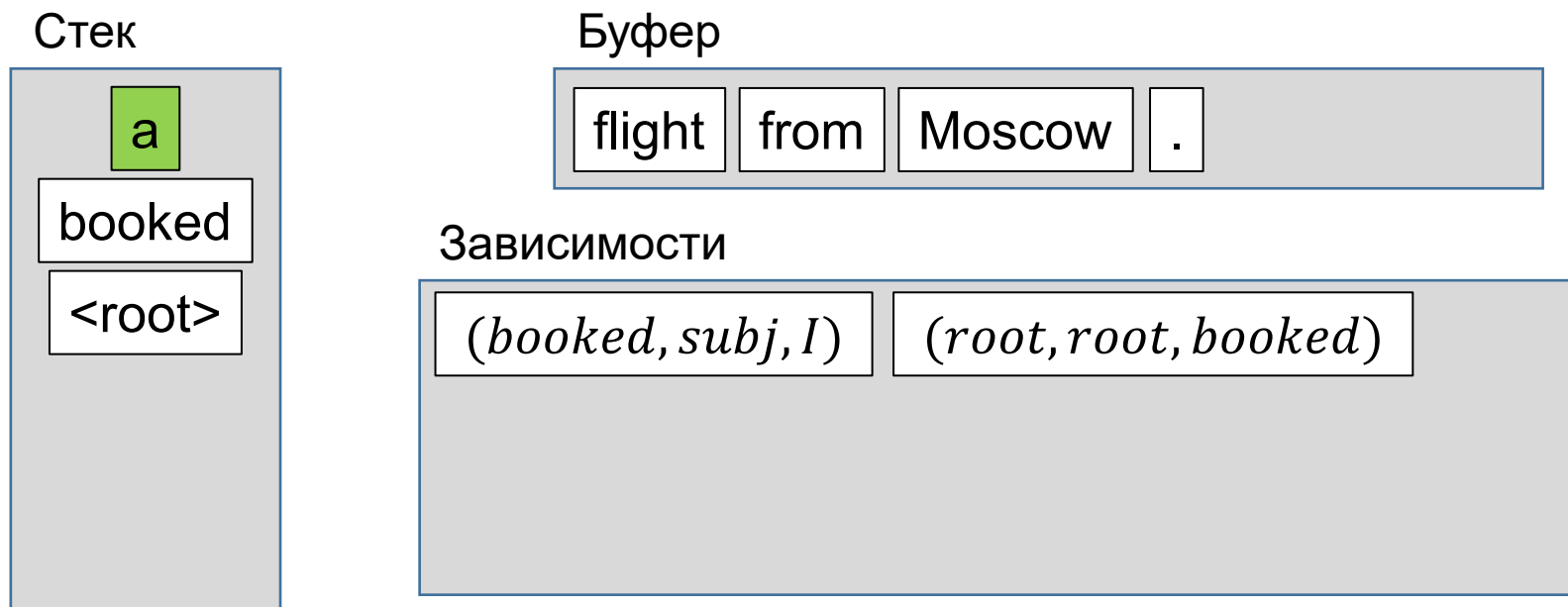
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$



Arc-eager



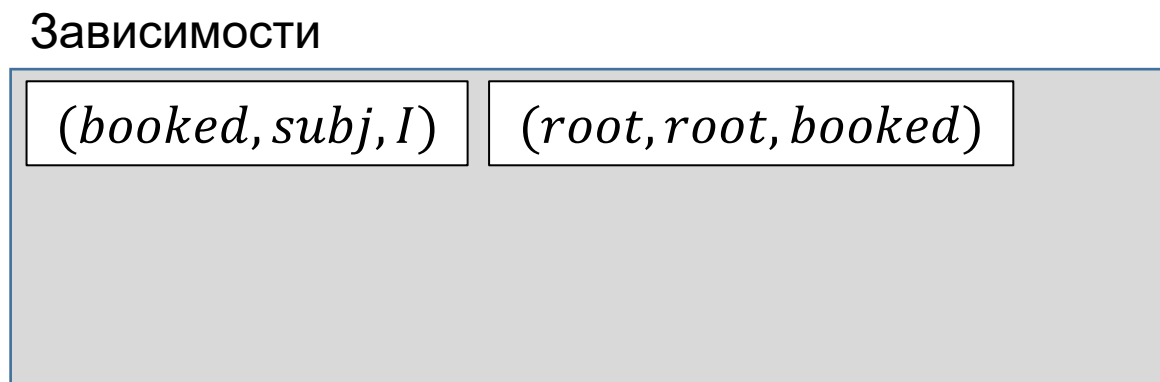
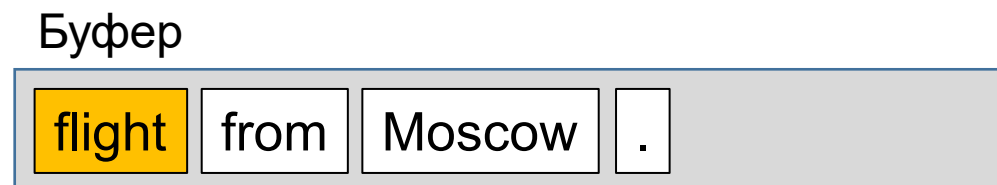
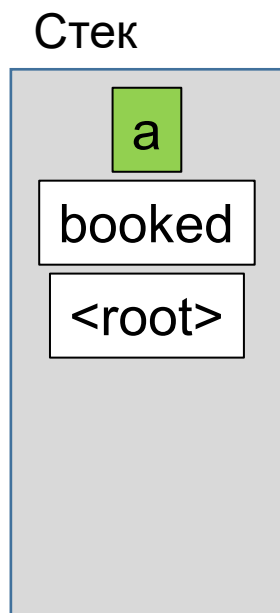
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

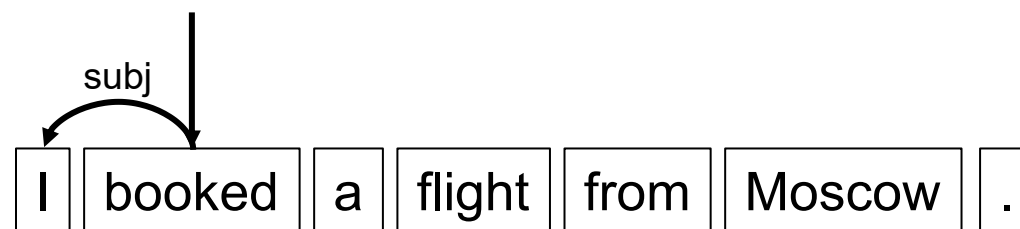


$$\text{Shift} \\ (\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$$

$$\text{LeftArc}_l \\ ([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$$

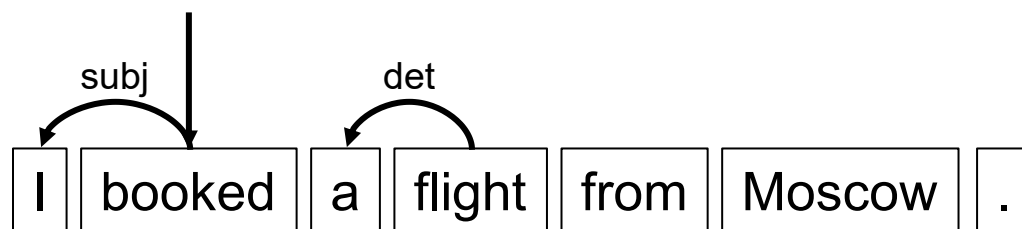
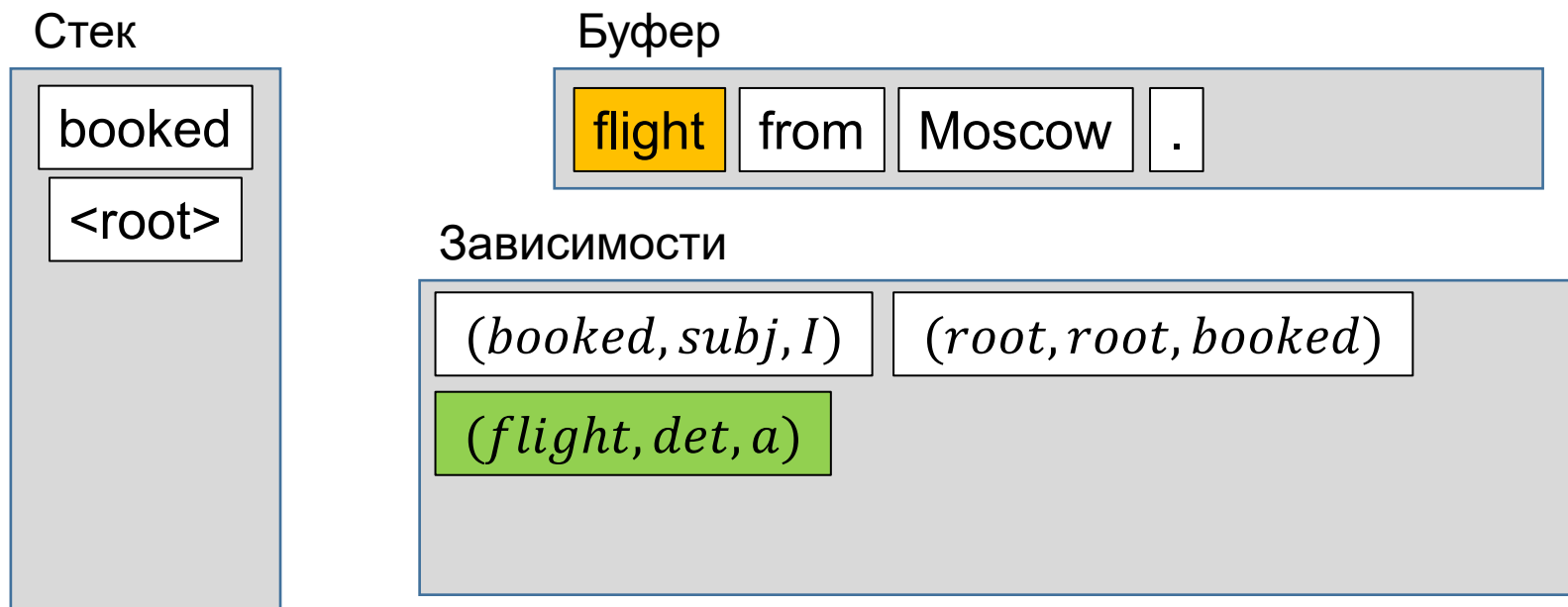
$$\text{RightArc}_l \\ ([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$$

$$\text{Reduce} \\ ([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$$



LeftArc_{det}

Arc-eager



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

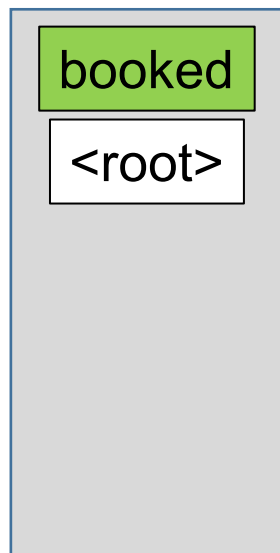
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

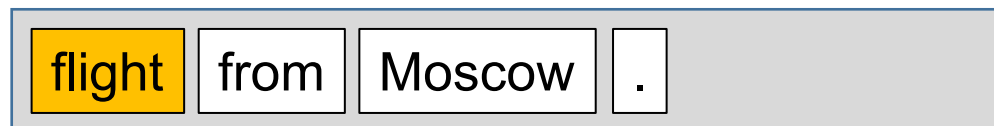
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

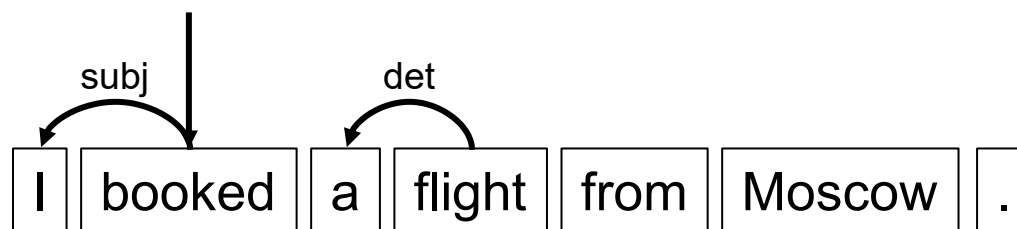
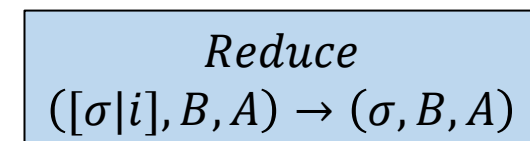
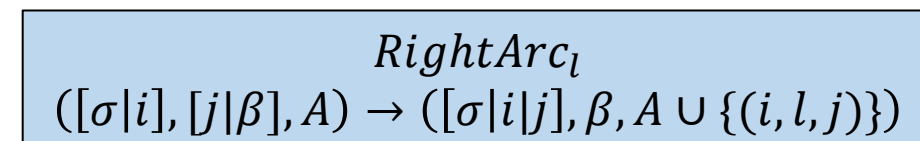
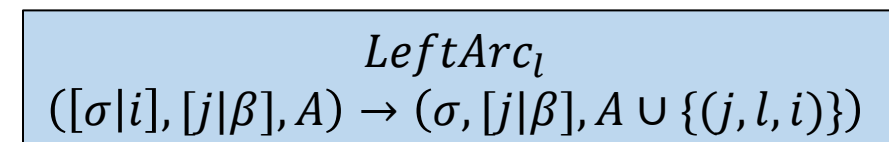
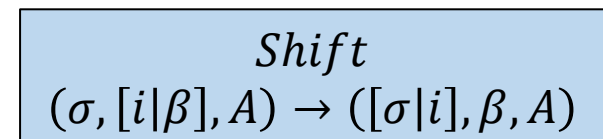
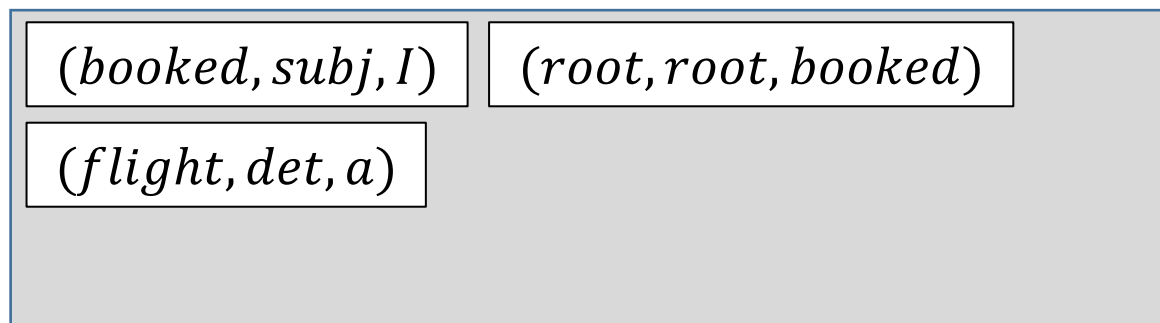
Стек



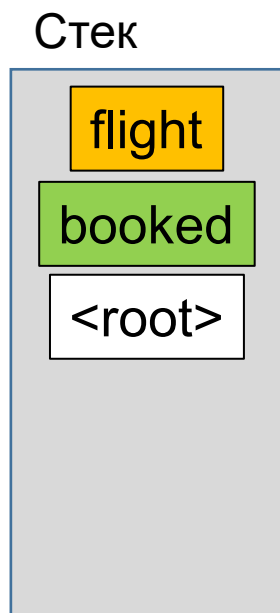
Буфер



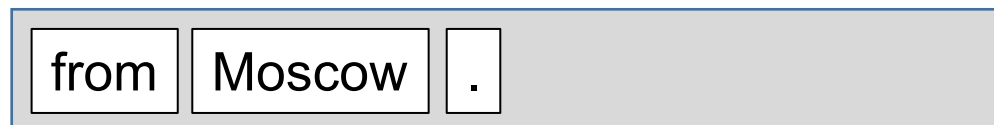
Зависимости



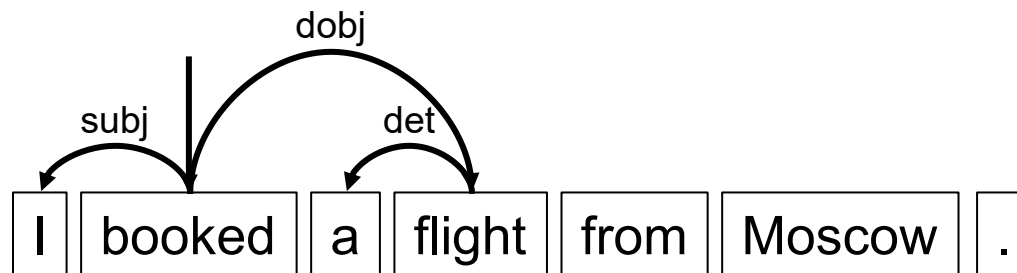
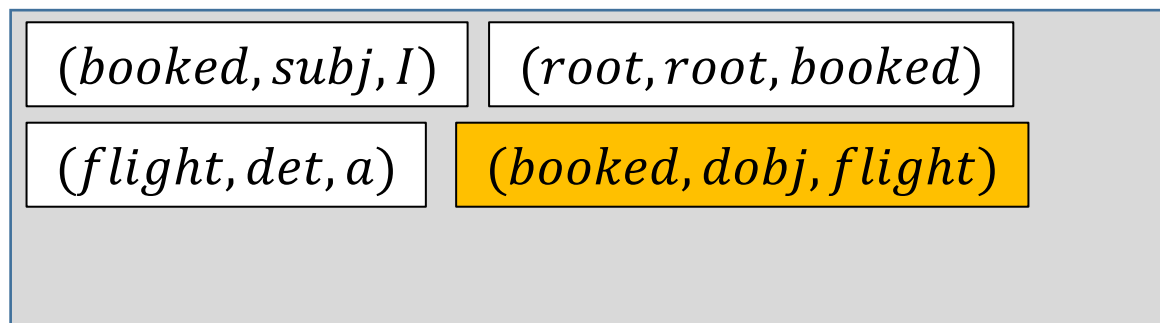
Arc-eager



Буфер



Зависимости



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

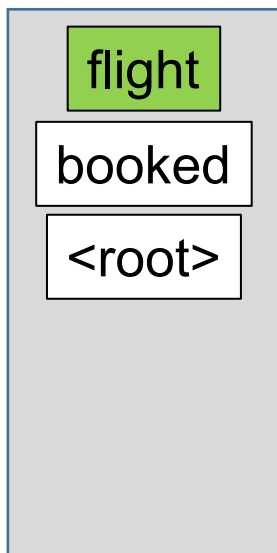
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

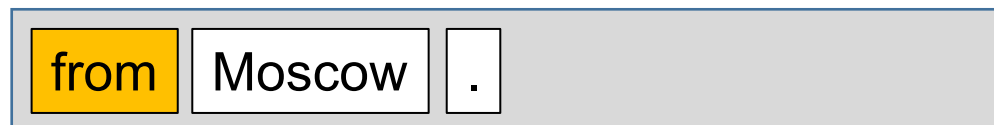
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

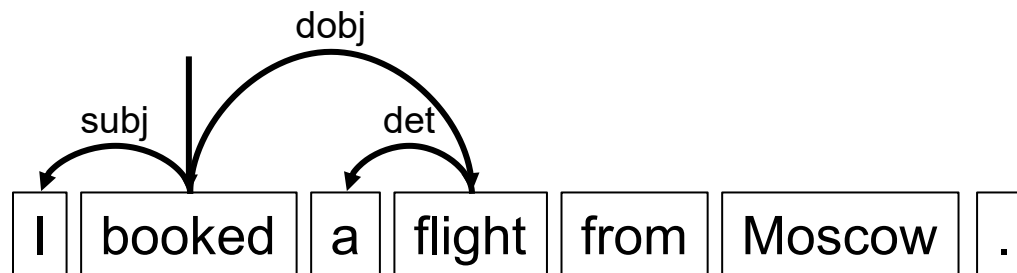
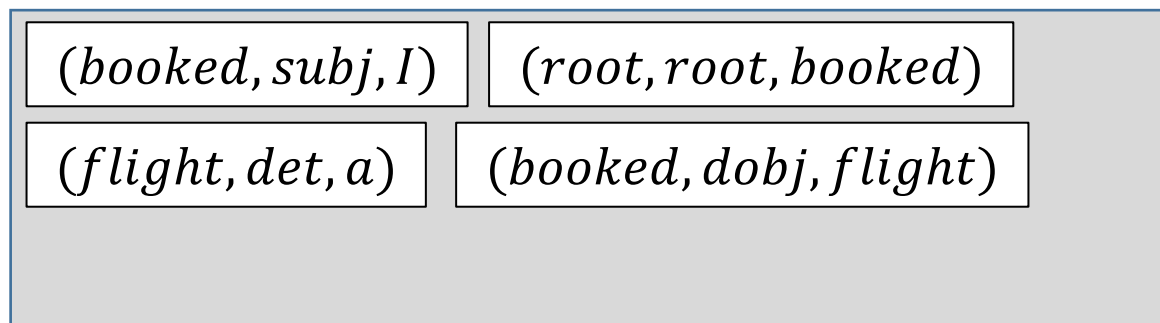
Стек



Буфер



Зависимости



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

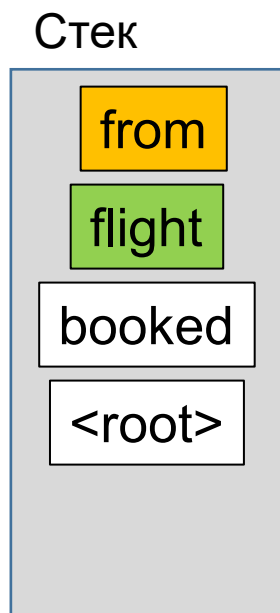
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

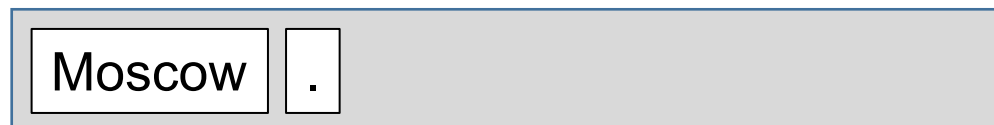
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$



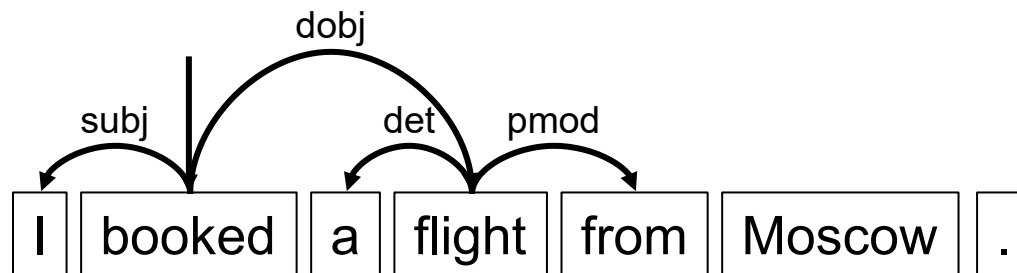
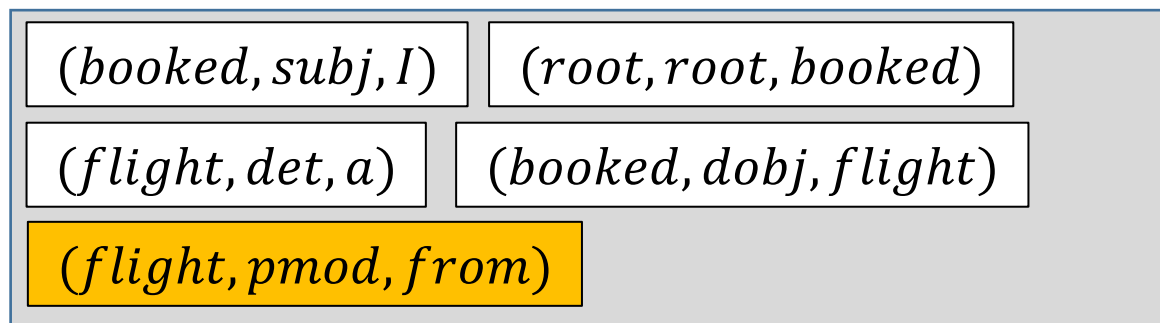
Arc-eager



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

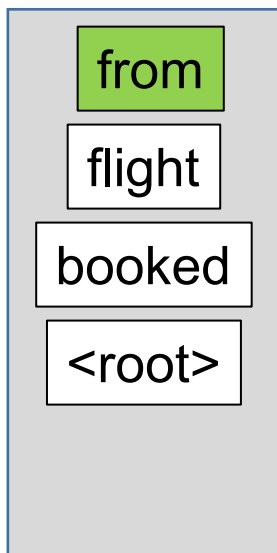
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

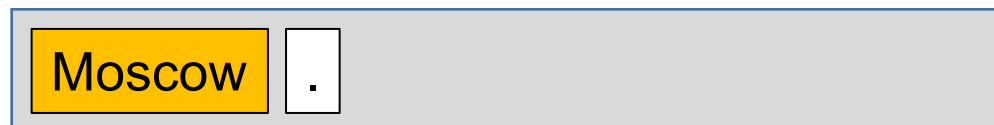
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

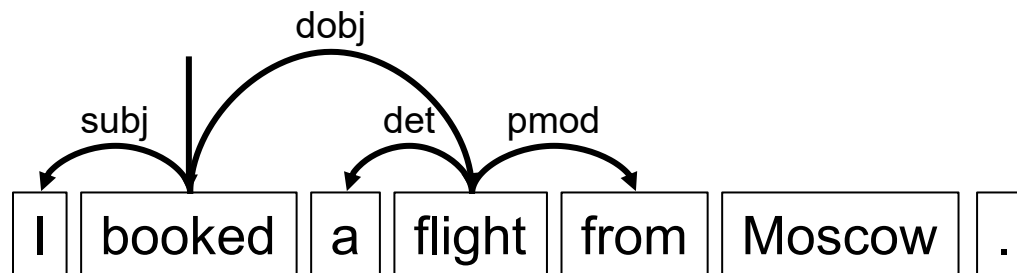
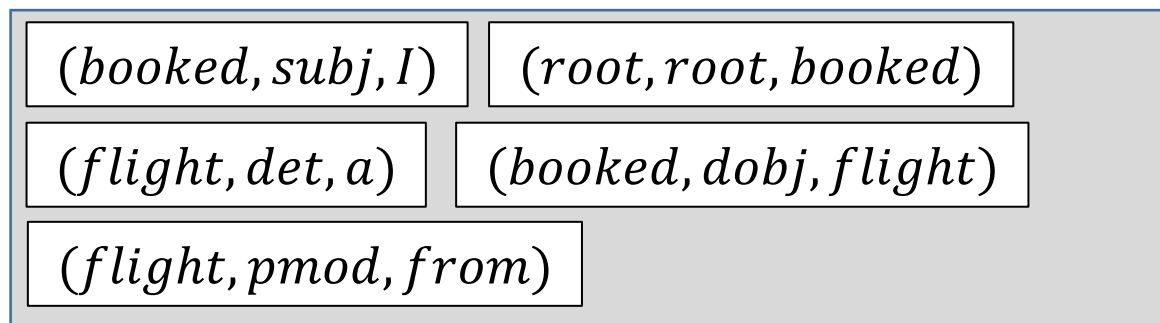
Стек



Буфер



Зависимости



RightArc_{prep}

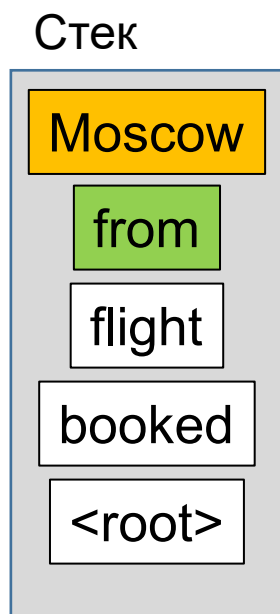
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

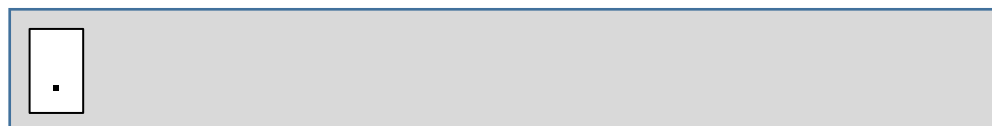
RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i|j], \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

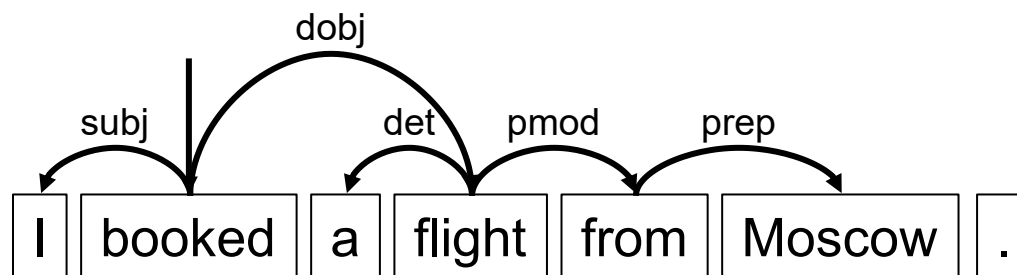
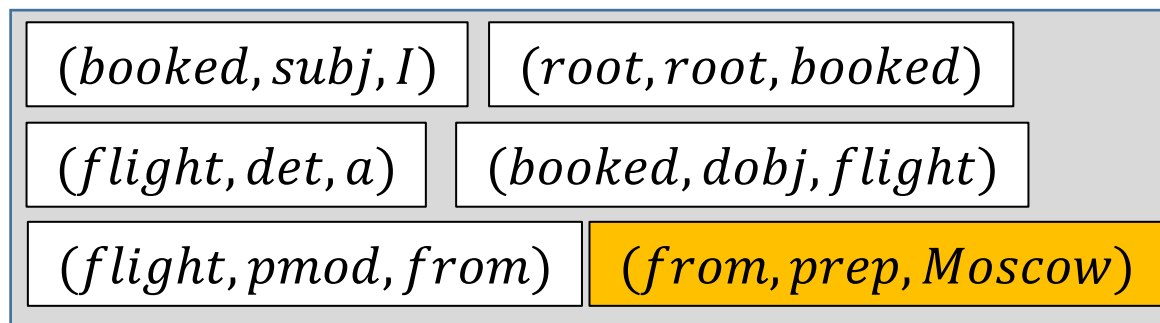
Arc-eager



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

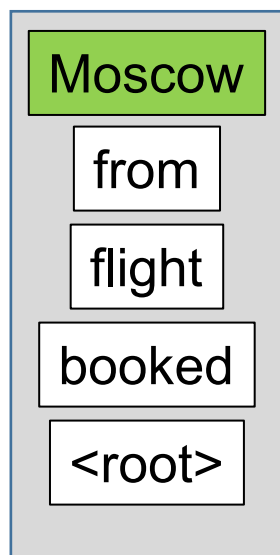
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

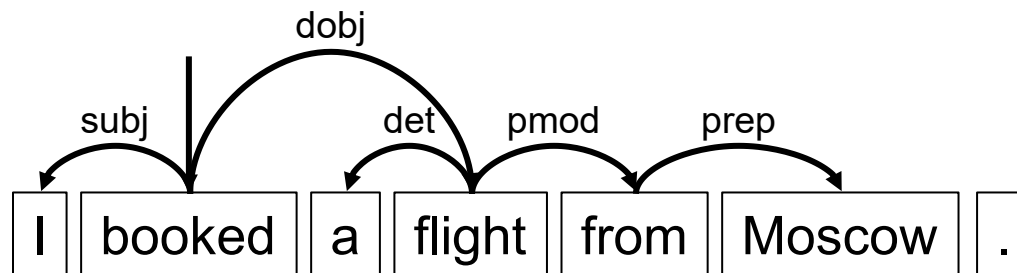
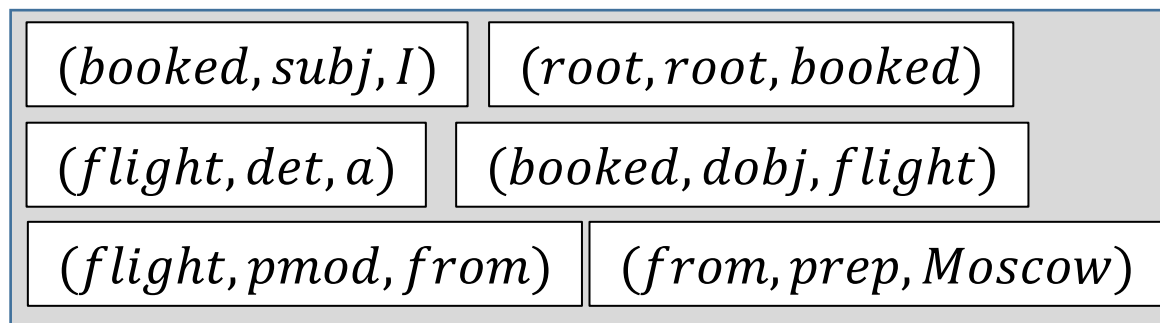
Стек



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



Reduce

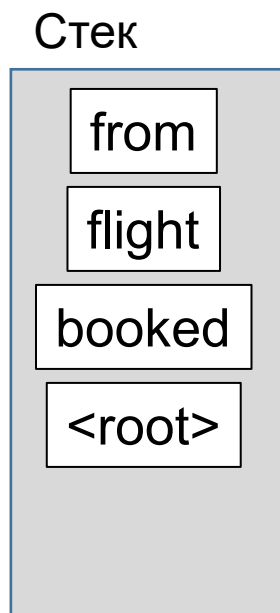
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

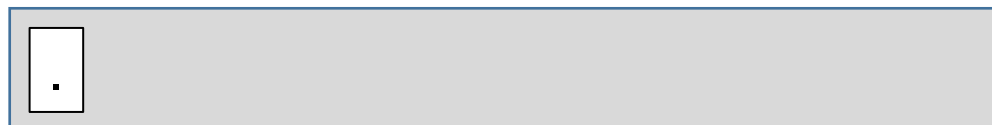
RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

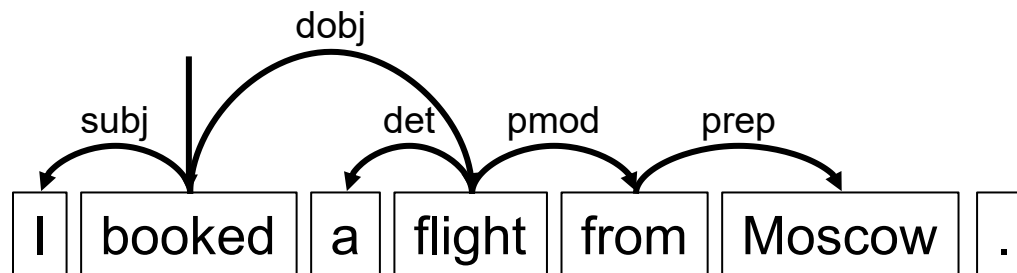
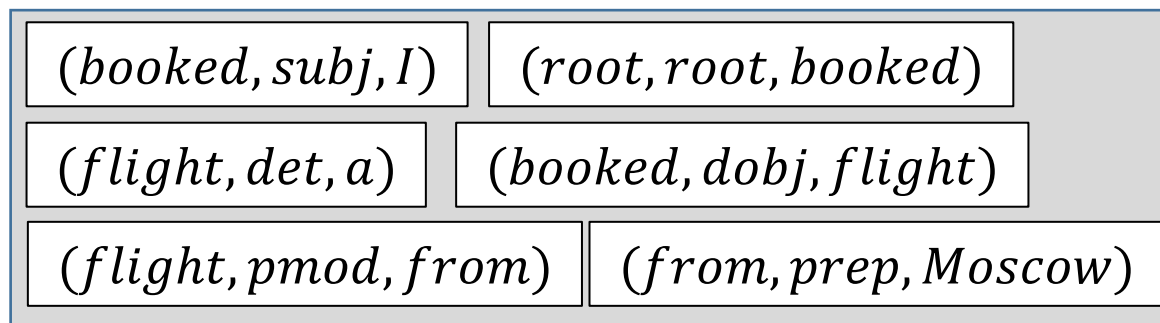
Arc-eager



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

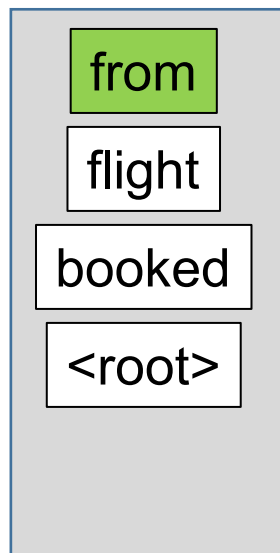
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

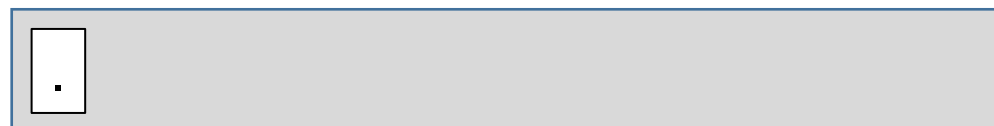
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

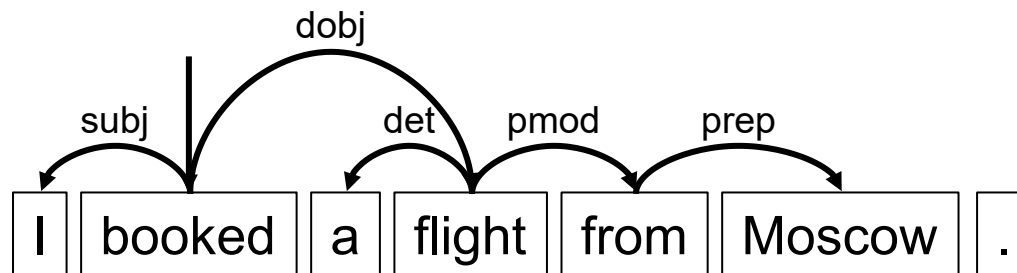
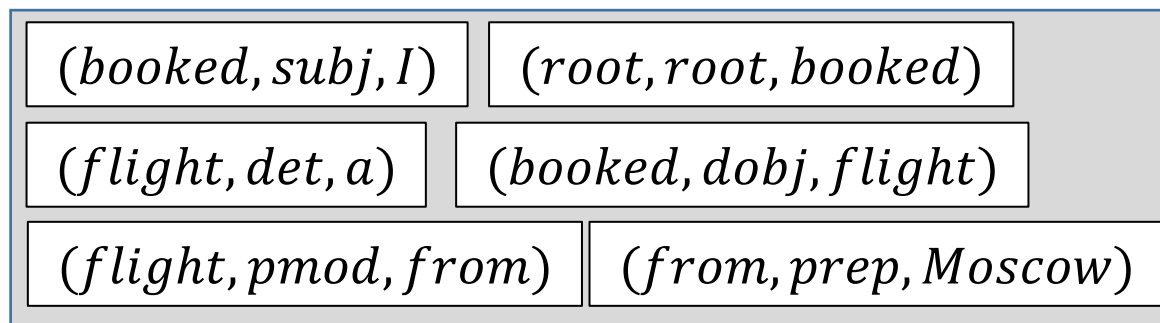
Стек



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



Reduce

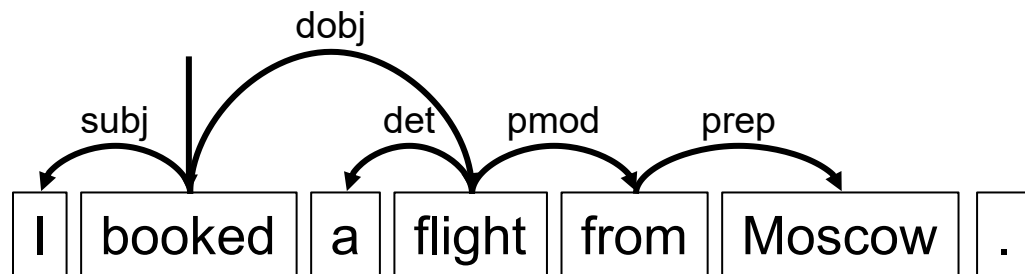
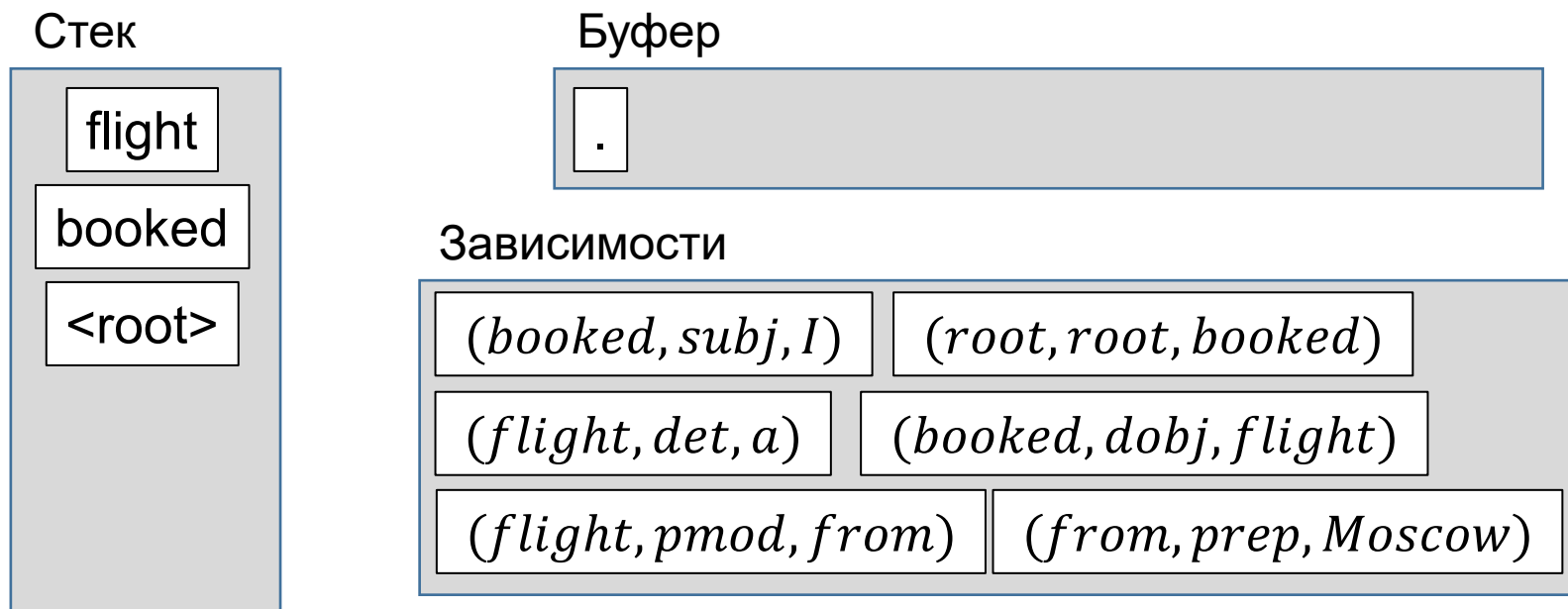
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

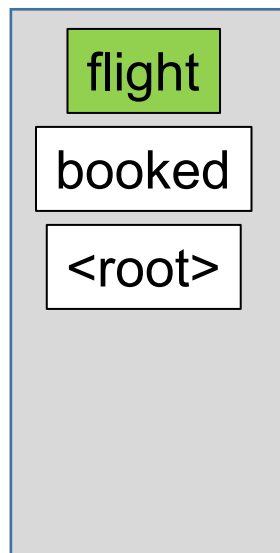
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

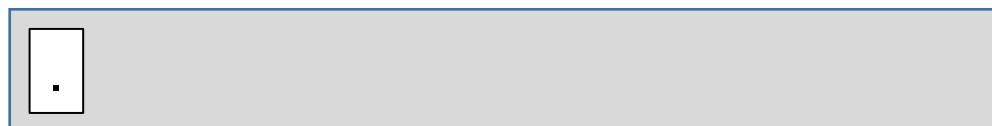
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

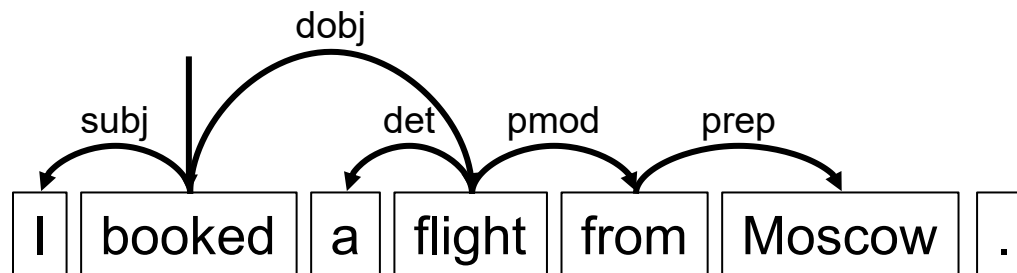
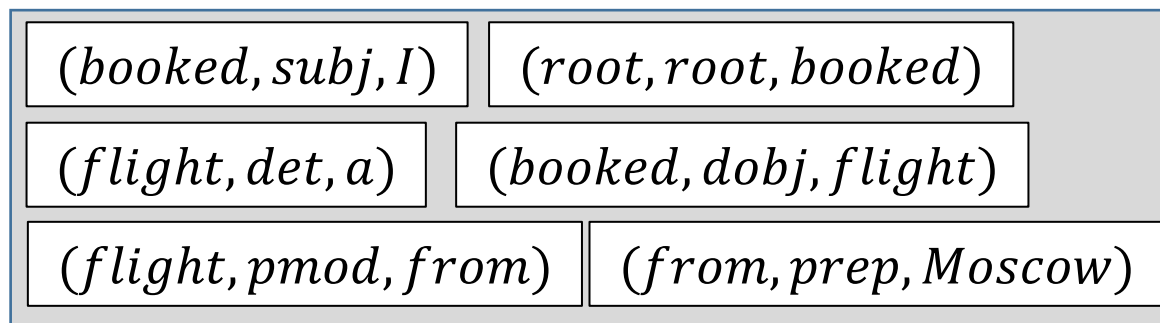
Стек



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



Reduce

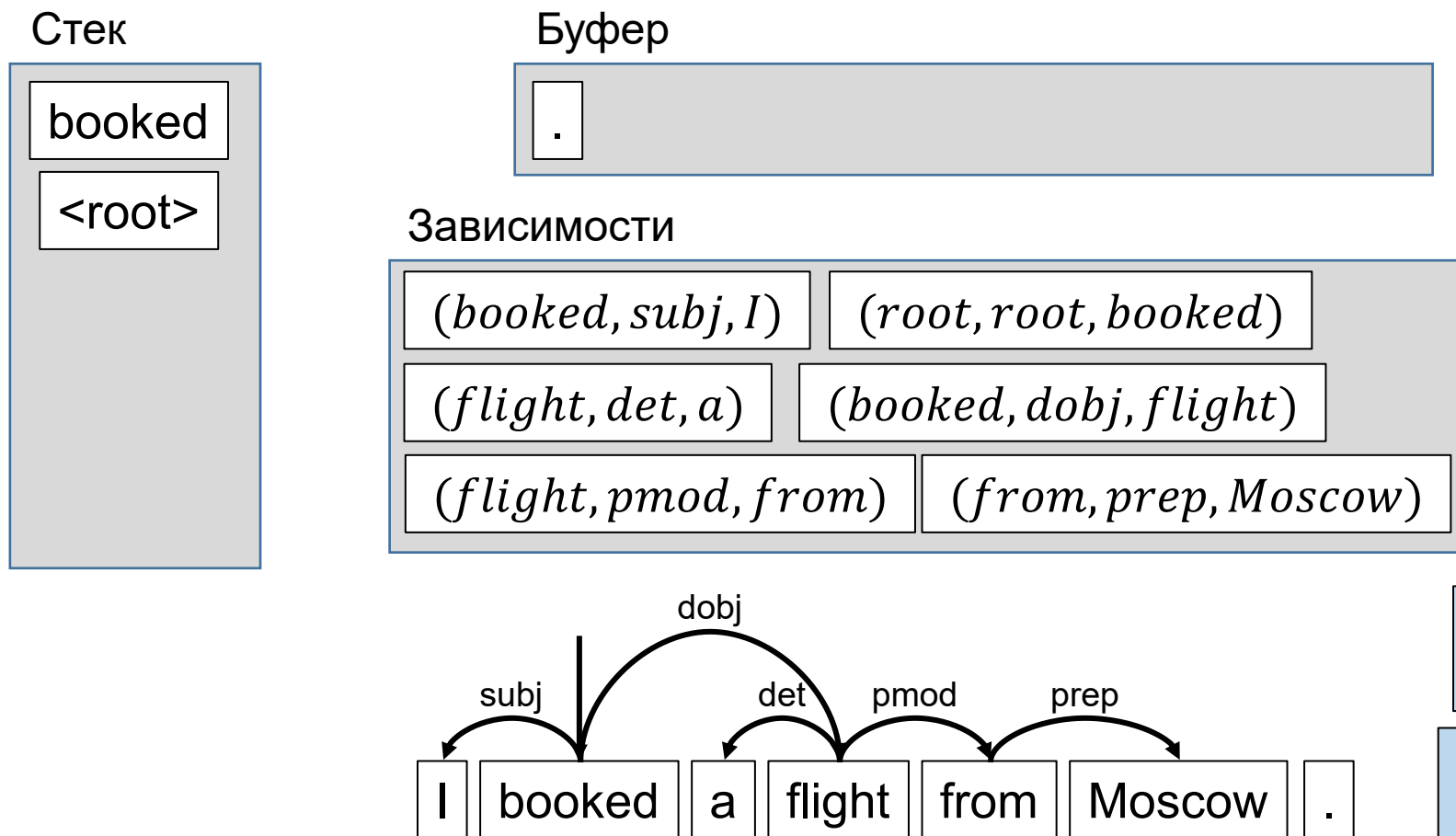
Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

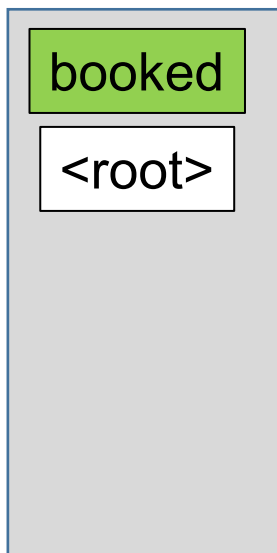
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

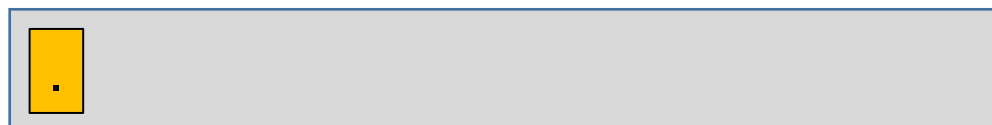
Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Arc-eager

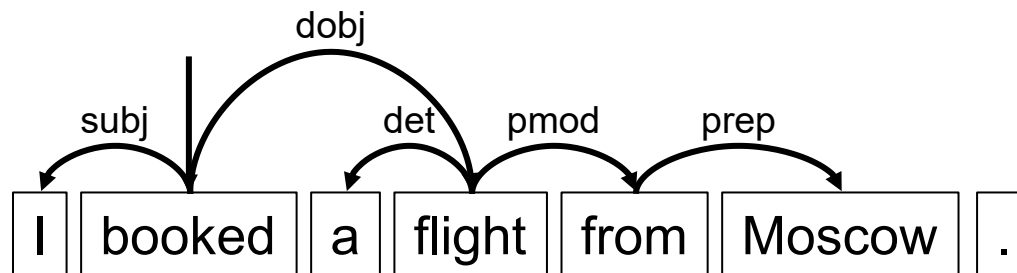
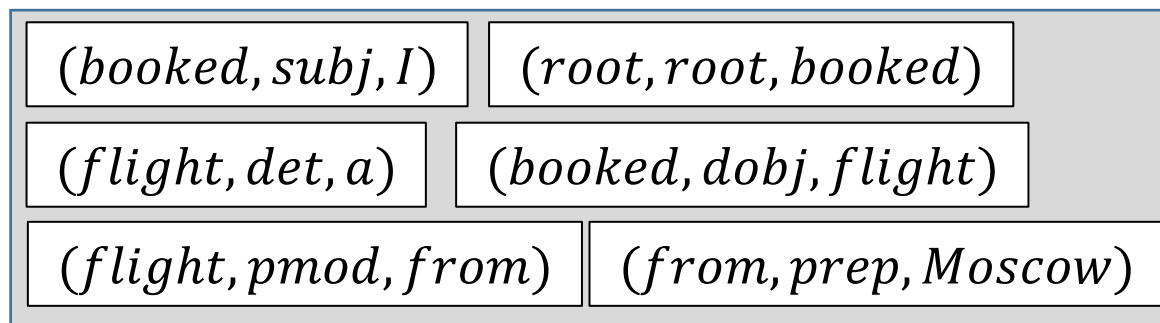
Стек



Буфер



Зависимости



Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

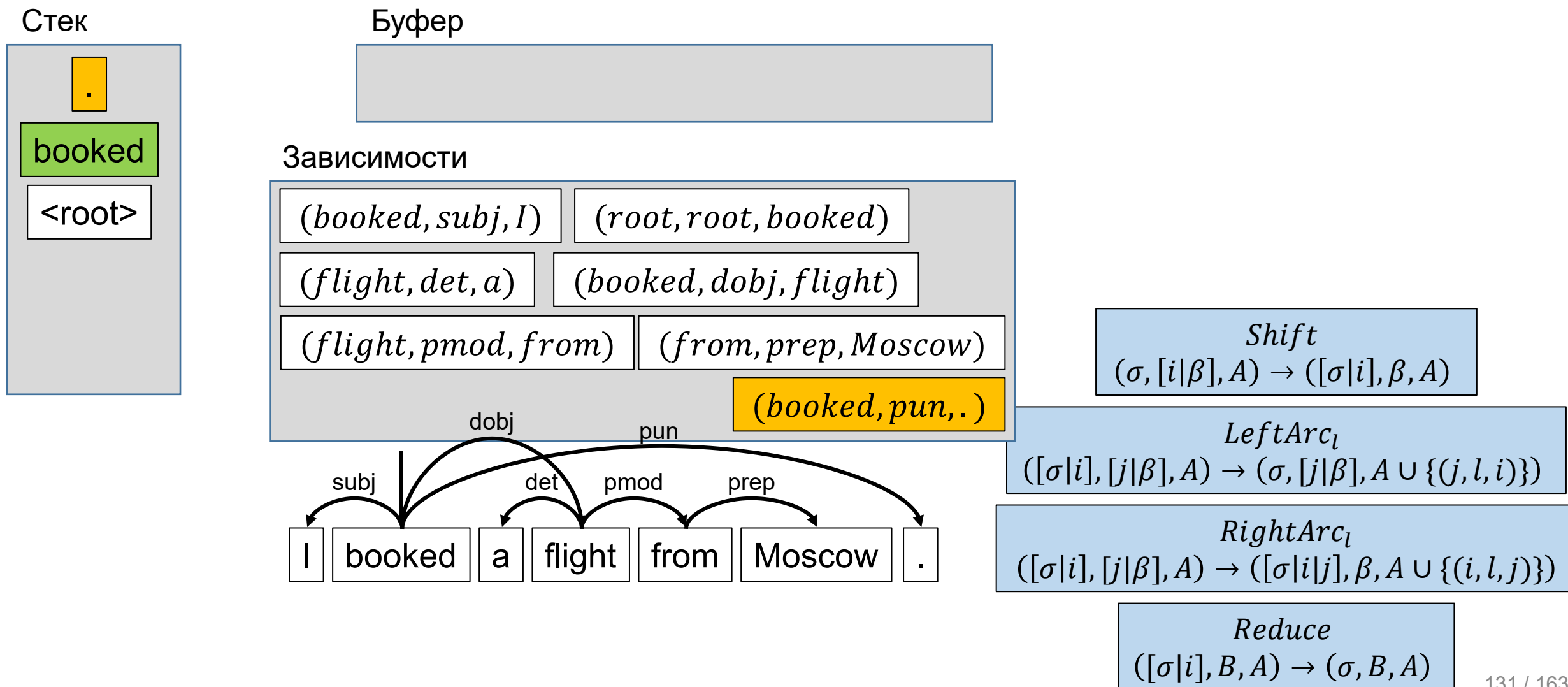
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

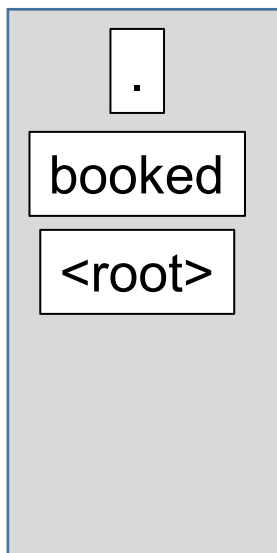
RightArc_{pun}

Arc-eager



Arc-eager

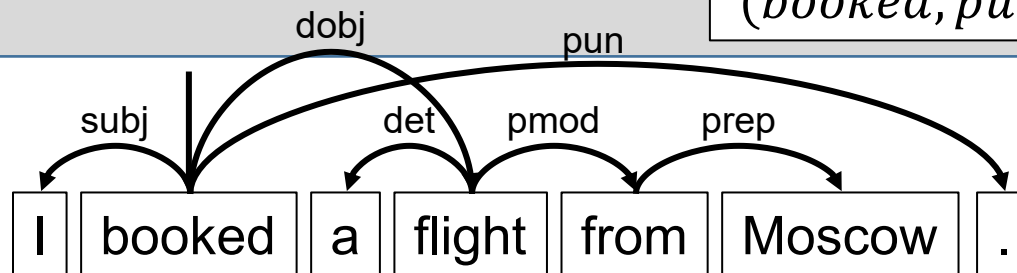
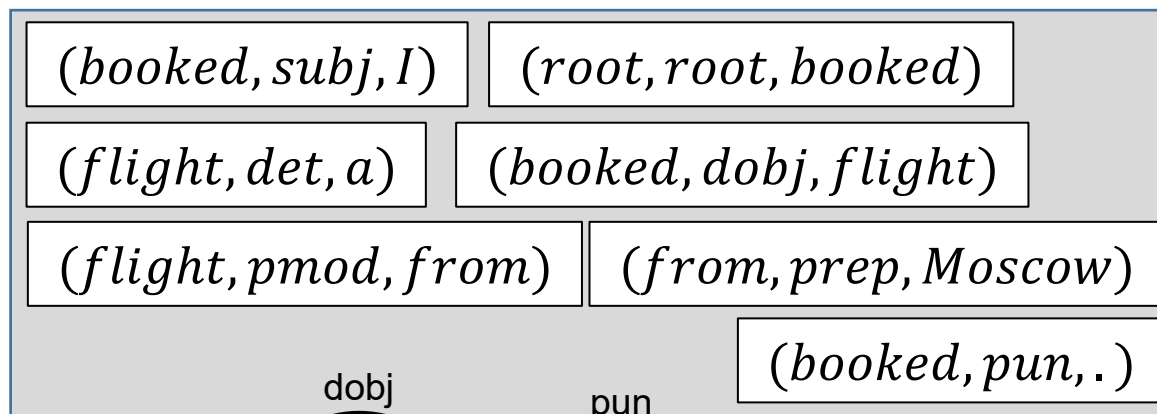
Стек



Буфер



ЗАВИСИМОСТИ



DONE!!!

Shift
 $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

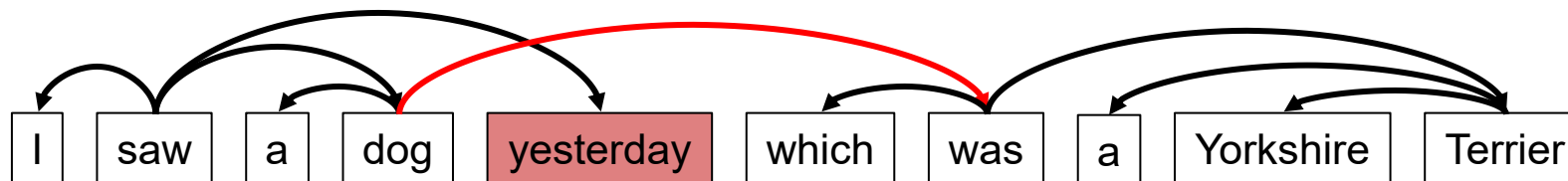
LeftArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow (\sigma, [j|\beta], A \cup \{(j, l, i)\})$

RightArc_l
 $([\sigma|i], [j|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i]j, \beta, A \cup \{(i, l, j)\})$

Reduce
 $([\sigma|i], B, A) \rightarrow (\sigma, B, A)$

Проективное синтаксическое дерево

- Дерево зависимостей является проективным, если
 - Для каждой дуги в дереве существует направленный путь от главного слова до каждого из слов, расположенных между главным и зависимым словом этой дуги
 - $(i, l, j) \Rightarrow \forall k \in [\min(i, j), \max(i, j)], i \rightarrow^* k$



Non-projective Transition-based Parsing: Attardi's system

- Инициализация
 - $c_s(x = x_1 \dots x_n) = ([0], [1, \dots, n], \emptyset)$
- Конечное состояние
 - $C_t = \{c \in C \mid c = ([0], [], A)\}$
- Переходы (для левых зависимостей требуется $i \neq 0$)
 - *(Shift)* $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$
 - *(LeftArc_l)* $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$
 - *(RightArc_l)* $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$
 - *(LeftArc2_l)* $([\sigma|i|k|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|k|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$
 - *(RightArc2_l)* $([\sigma|i|k|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i|k], B, A \cup \{(i, l, j)\})$
 - *(LeftArc3_l)* $([\sigma|i|k_1|k_2|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|k_1|k_2|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$
 - *(RightArc3_l)* $([\sigma|i|k_1|k_2|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i|k_1|k_2], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

Non-projective Transition-based Parsing: Online reordering

- Инициализация

- $c_s(x = x_1 \dots x_n) = ([0], [1, \dots, n], \emptyset)$

- Конечное состояние

- $C_t = \{c \in C \mid c = ([0], [], A)\}$

- Переходы

- (*Shift*) $(\sigma, [i|\beta], A) \rightarrow ([\sigma|i], \beta, A)$

- (*LeftArc_l*) $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|j], B, A \cup \{(j, l, i)\})$, если $i \neq 0$

- (*RightArc_l*) $([\sigma|i|j], B, A) \rightarrow ([\sigma|i], B, A \cup \{(i, l, j)\})$

- (*Swap*) $([\sigma|i|j], \beta, A) \rightarrow ([\sigma|j], [i|\beta], A)$, если $i \neq 0$ и $i < j$

Transition-based Parsing. Предсказание переходов

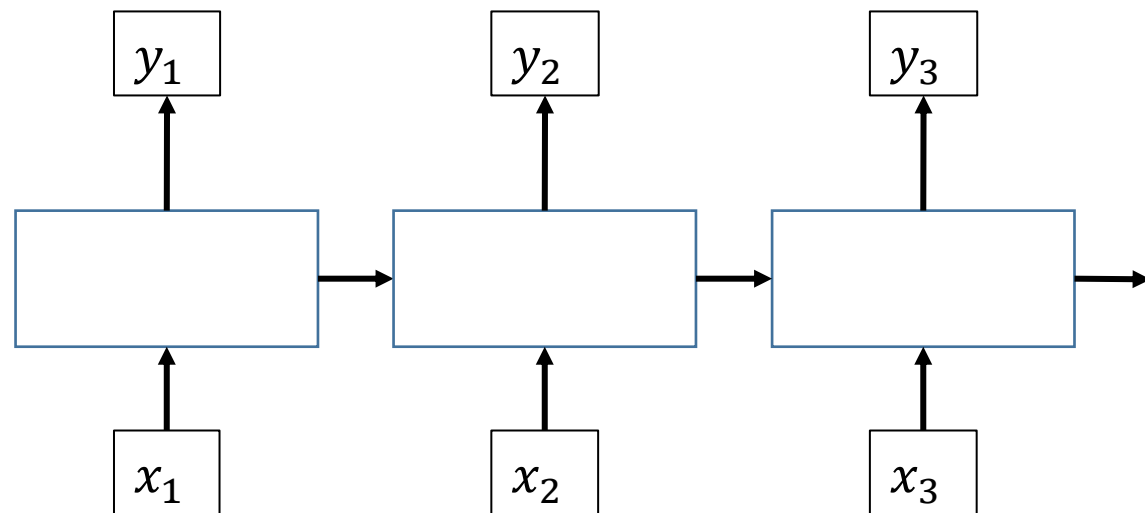
- Задача многоклассовой классификации
 - Объекты классификации: конфигурации парсера
 - Классы: правила перехода
- Методы:
 - Multiclass SVM
 - Naïve Bayes
 - Decision trees
 - Нейронные сети
 - ...

Признаки классификации

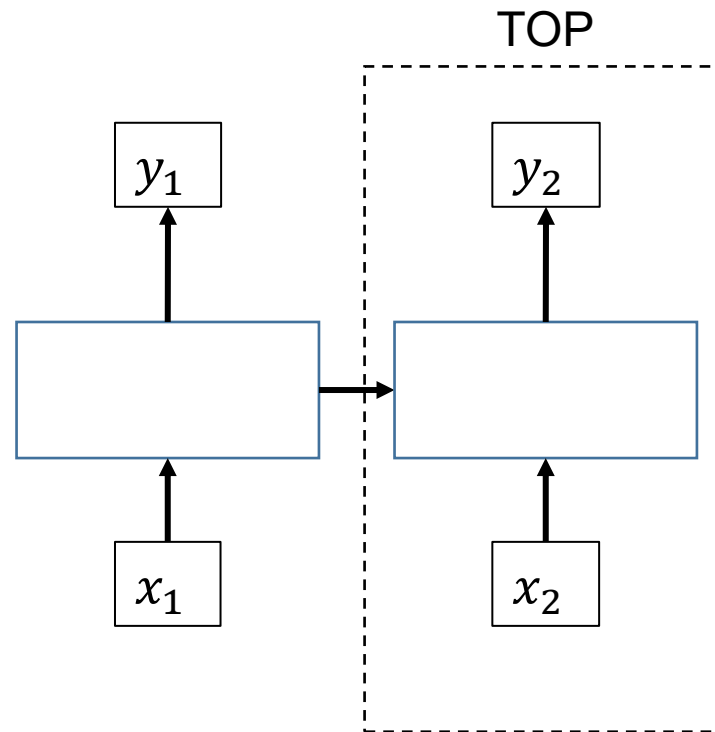
- Признаки для элемента
 - Словоформа
 - Лемма
 - Часть речи
 - Значения грамматических категорий
 - Тип отношения
- Элементы:
 - i -й элемент стека
 - i -й элемент буфера
 - Левое отношение элемента стека
 - Правое отношение элемента стека

Long Short-Term Memory

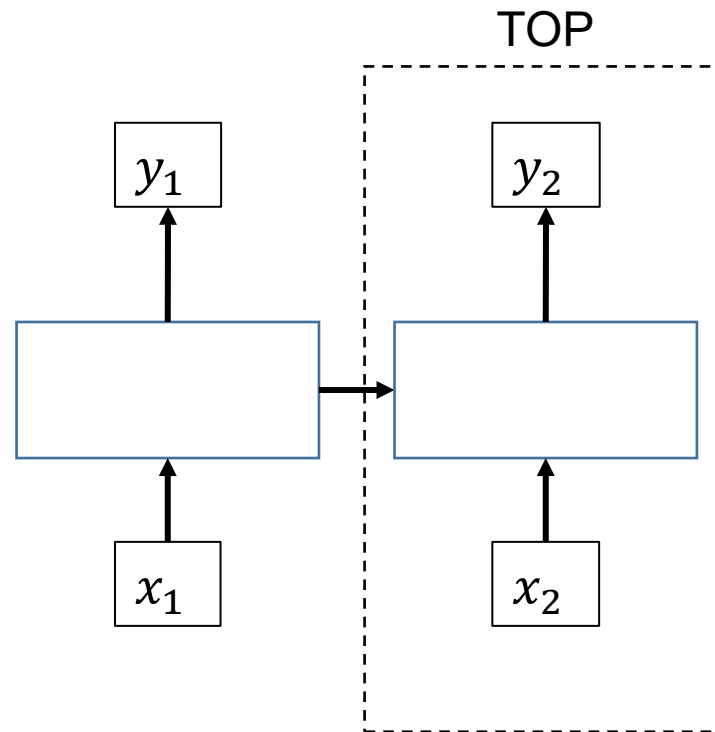
- $i_t = \sigma(W_{ix}x_t + W_{ih}h_{t-1} + W_{ic}c_{t-1} + b_i)$
- $f_t = \sigma(W_{fx}x_t + W_{fh}h_{t-1} + W_{fc}c_{t-1} + b_f)$
- $c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tanh(W_{cx}x_t + W_{ch}h_{t-1} + b_c)$
- $o_t = \sigma(W_{ox}x_t + W_{oh}h_{t-1} + W_{oc}c_t + b_o)$
- $h_t = o_t \odot \tanh(c_t)$
- $y_t = g(h_t)$



Stack Long Short-Term Memory

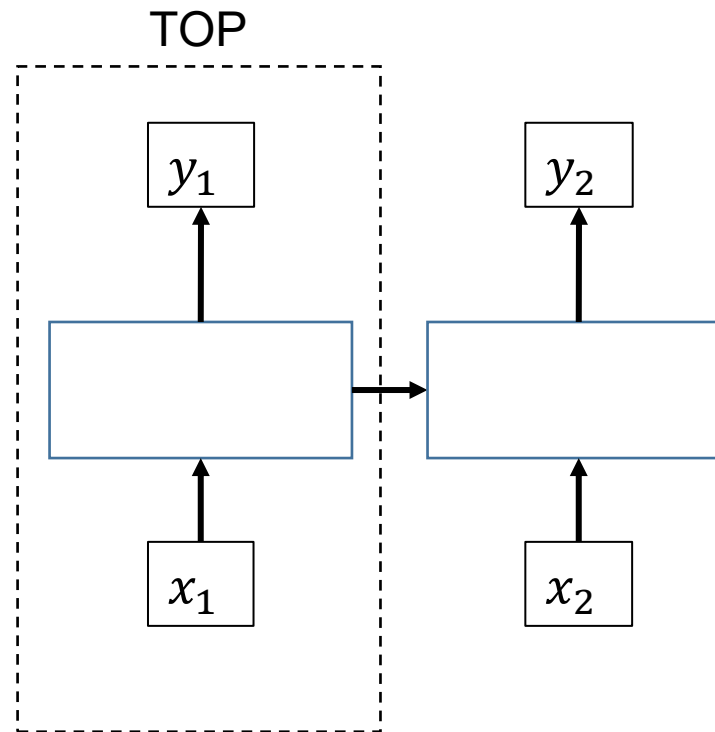


Stack Long Short-Term Memory

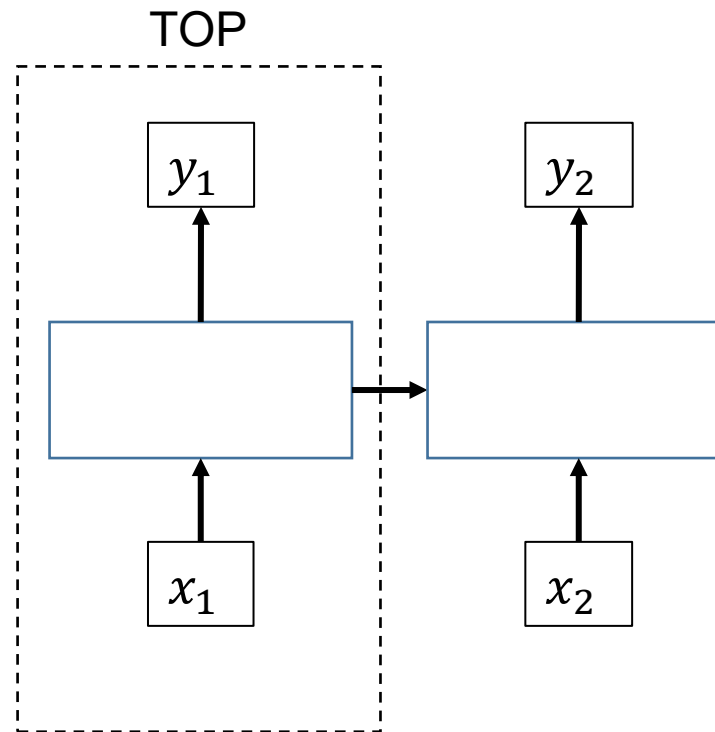


POP

Stack Long Short-Term Memory

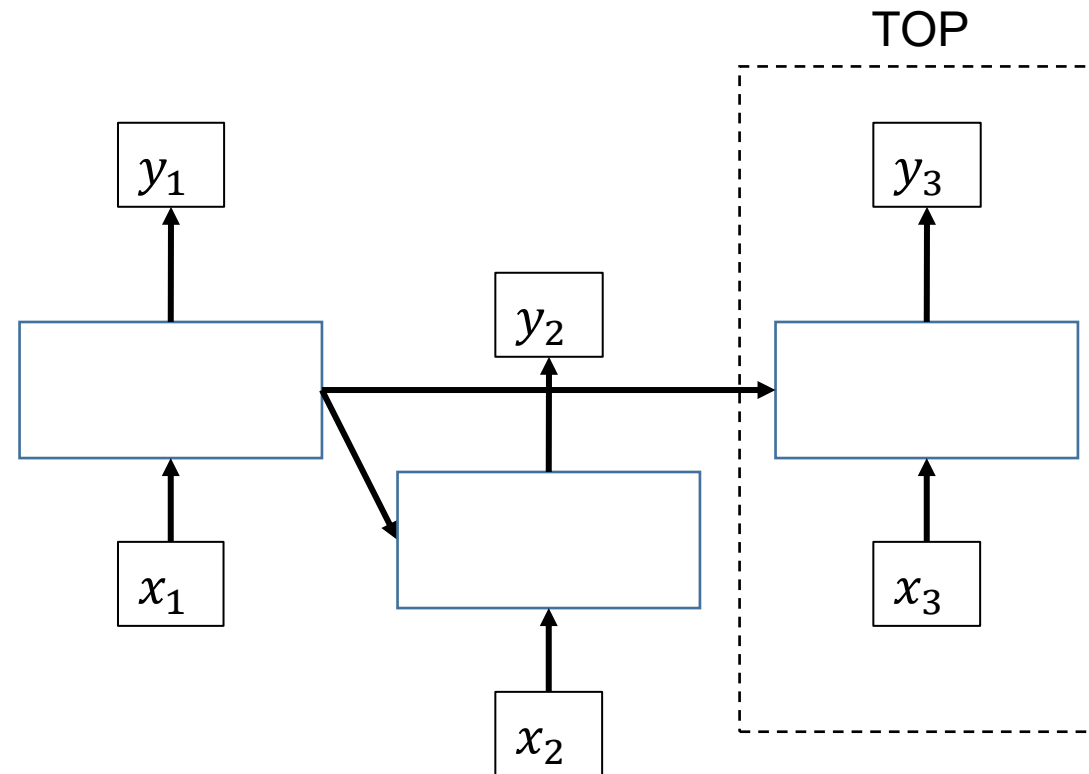


Stack Long Short-Term Memory

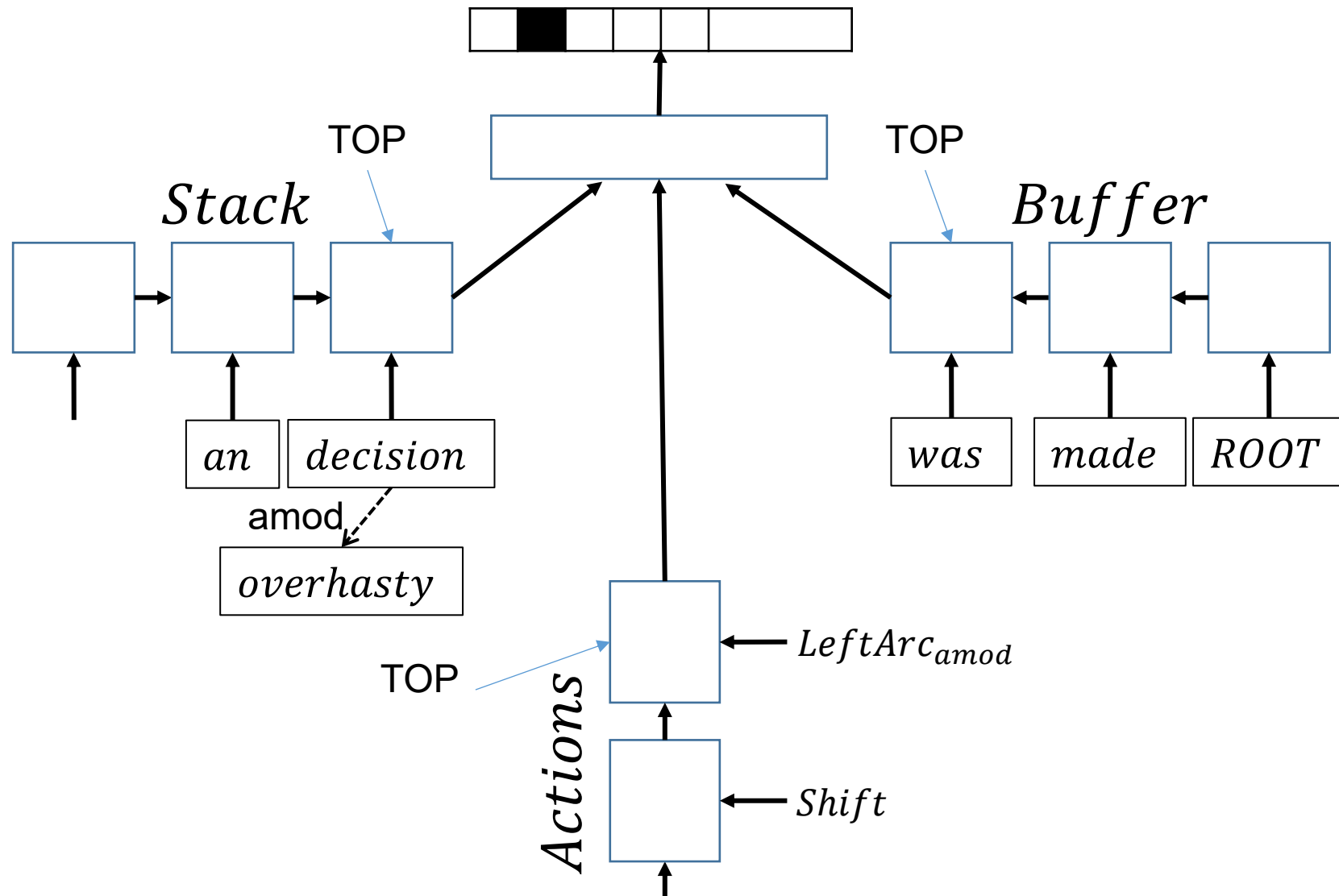


PUSH x_3

Stack Long Short-Term Memory



Stack LSTM Parser



Stack LSTM Parser

- Переходы Arc-standard

- *Shift*

$$(\sigma, [(v_i, i) | \beta], A) \rightarrow ([\sigma | (v_i, i)], \beta, A)$$

- *LeftArc_r*

$$([\sigma | (v_i, i) | (v_j, j)], B, A) \rightarrow ([\sigma | (g_r(v_i, v_j), j)], B, A \cup \{j \xrightarrow{r} i\})$$

- *RightArc_r*

$$([\sigma | (v_i, i) | (v_j, j)], B, A) \rightarrow ([\sigma | (g_r(v_j, v_i), i)], B, A \cup \{i \xrightarrow{r} j\})$$

Оценка качества

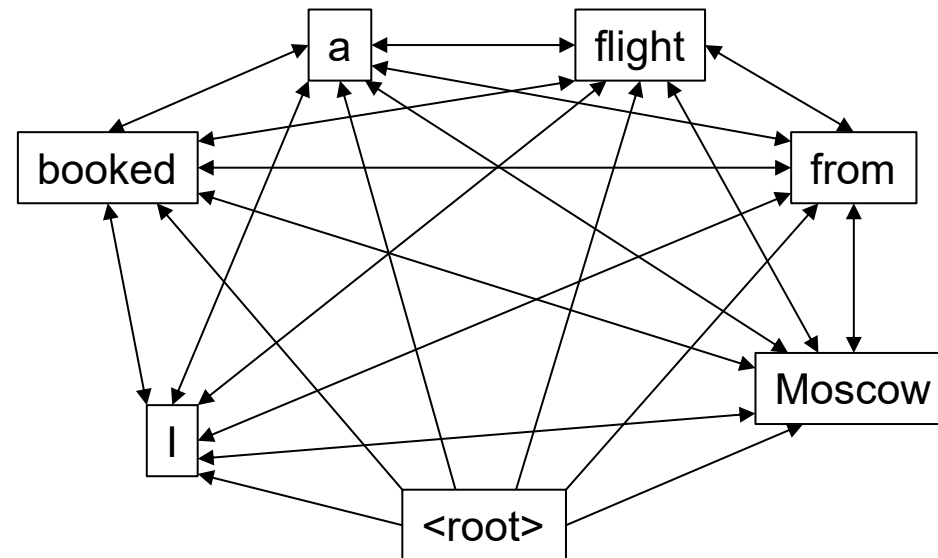
- Labeled attachment score (LAS):
 - Отношение количества правильно построенных дуг к общему количеству дуг
- Labeled exact match (LEM):
 - Отношение количества правильно построенных деревьев к общему количеству деревьев
- Unlabeled attachment score/exact match (UAS/UEM):
 - Те же метрики, но дуги рассматриваются без типов

Оценка качества

- Micro-averaged
 - Считаем отношение количества правильных дуг во всем корпусе к общему количеству дуг в этом корпусе
- Macro-averaged
 - Считаем метрику для каждого предложения и потом усредняем

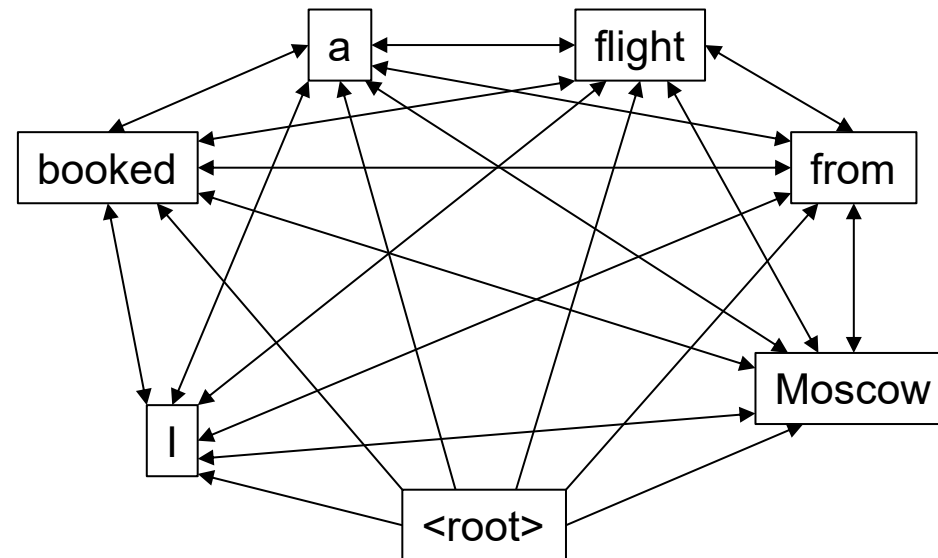
Графовые методы

- Предложение представляется в виде взвешенного полного графа (ориентированного)
 - Вершины графа – слова + <root>
 - Дуги графа – отношения между словами
- Цель
 - Найти подграф, являющийся деревом зависимостей



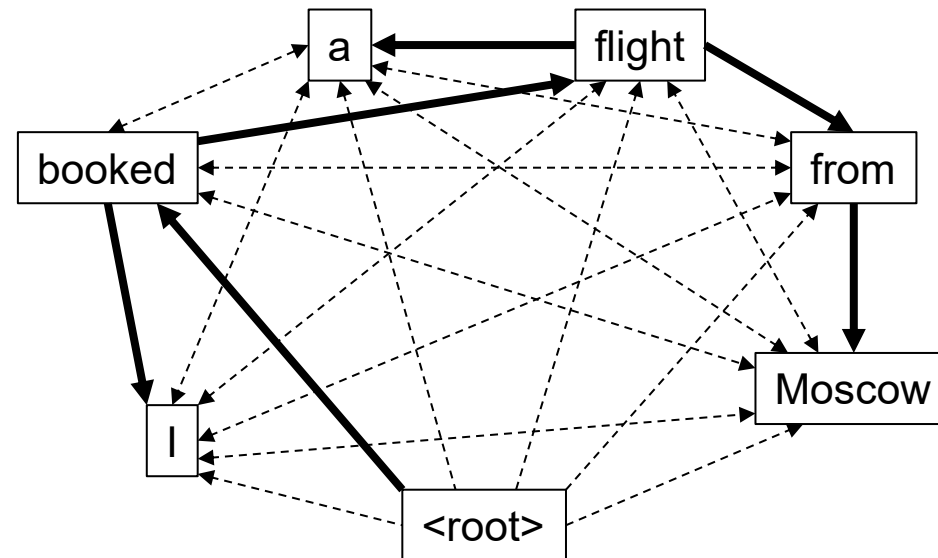
Графовые методы

- Для каждой дуги (i, j) вычисляется ее вес $s(i, j)$
- Вес подграфа в графе $s(x, y) = \sum_{(i,j) \in y} s(i, j)$, где
 - x – вершины подграфа,
 - y – дуги подграфа



Максимальное остовное дерево (MST)

- Задача синтаксического анализа формулируется как задача нахождения максимального остовного дерева (MST) в связанном взвешенном графе
 - Остовное дерево графа – подграф, который:
 - Включает все вершины графа
 - Ациклический
 - Связный



Алгоритм Эдмондса

- На входе:
 - Ориентированный граф $D = \langle V, E \rangle$
 - Вершина $r \in V$ – корень
 - вещественные значения весов $w(e), \forall e \in E$
- На выходе:
 - Остовное ориентированное дерево A минимального веса $w(A) = \sum_{e \in A} w(e)$ с корнем r

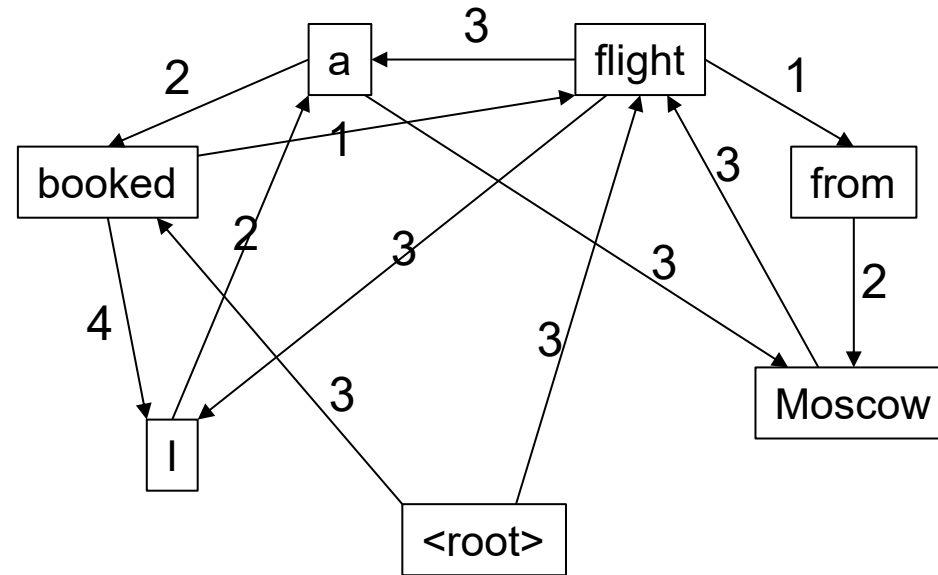
Алгоритм Эдмондса

- Пусть $f(\langle V, E \rangle, r, w)$ возвращает ориентированное дерево минимального веса с корнем в r
 1. Удалить все $(u, r) \in E$
 2. $\pi(v) = \arg \min_{u \in V} w((u, v)) \quad \forall v \in V$
 3. $P = \{(\pi(v), v) | v \in V \setminus \{r\}\}$. Если в P нет циклов, то P – искомое дерево
 4. C – произвольный цикл в P . Построим новый граф $D' = \langle V', E' \rangle$. $V' = \{v | v \in V, v \notin C\} \cup \{v_C\}$. E' построим так:
 - $(u, v) \in E, u \notin C, v \in C \Rightarrow$ добавляем в E' ребро $e = (u, v_C)$,
 $w'(e) = w(u, v) - w(\pi(v), v)$
 - $(u, v) \in E, u \in C, v \notin C \Rightarrow$ добавляем в E' ребро $e = (v_C, v)$,
 $w'(e) = w(u, v)$
 - $(u, v) \in E, u \notin C, v \notin C \Rightarrow$ добавляем в E' ребро $e = (u, v)$,
 $w'(e) = w(u, v)$
 5. $A' = f(\langle V', E' \rangle, r, w')$

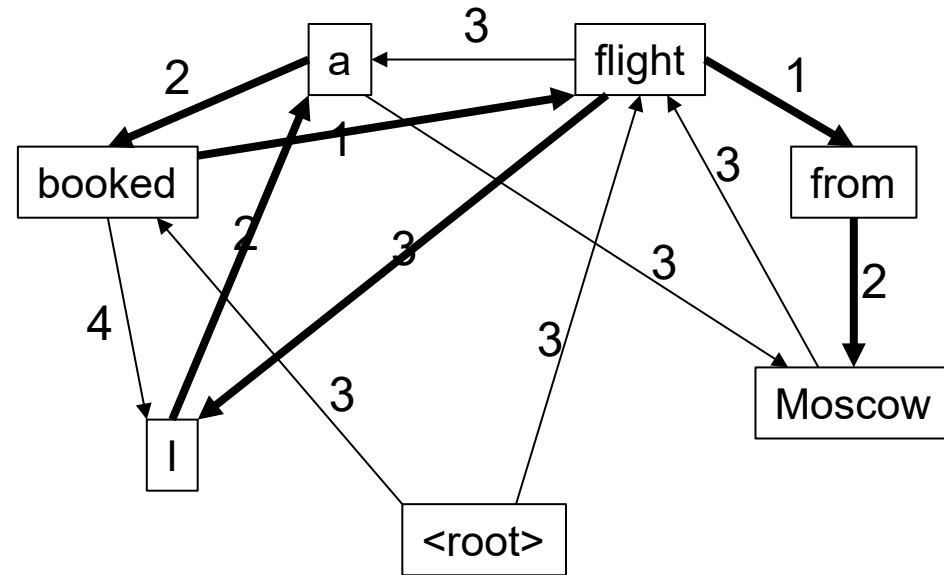
Алгоритм Эдмондса

- A' – ориентированное дерево, поэтому каждая $v \in V', v \neq r$ имеет одно входящее ребро (u, v)
- $(u, v_C) \in A'$ соответствует ребру $(u, v) \in E, v \in C$
- Удалим ребро $(\pi(v), v)$ из C
- Построим P' - искомое дерево:
 - Добавим в P' ребра из C
 - Добавим в P' все ребра, соответствующие ребрам из A'

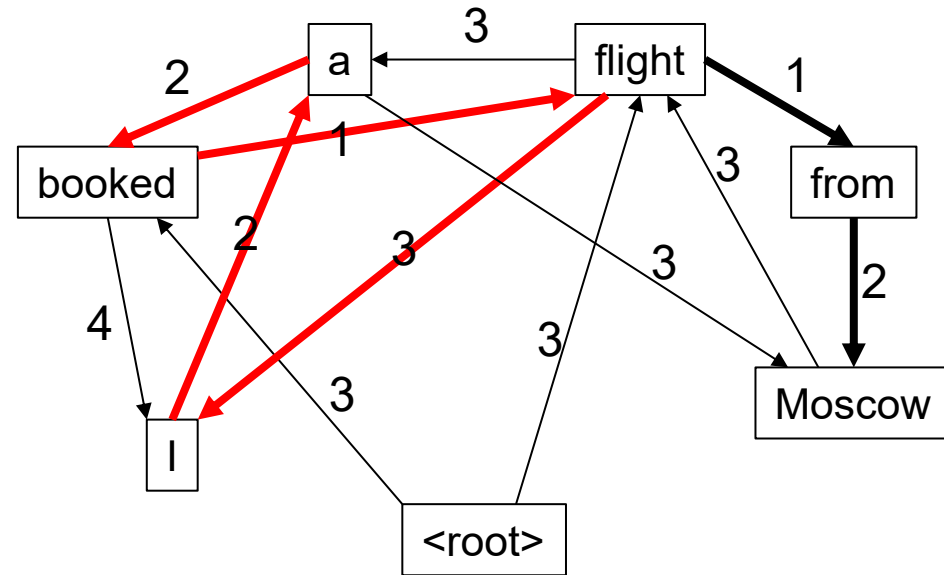
Алгоритм Эдмондса



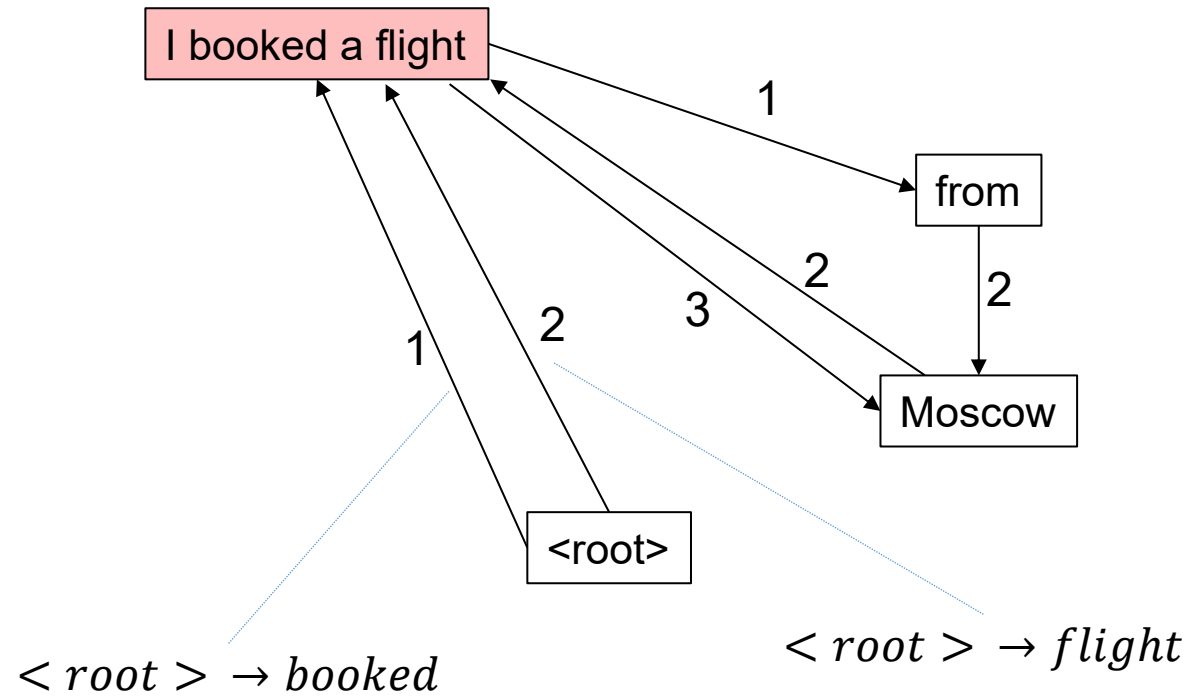
Алгоритм Эдмондса



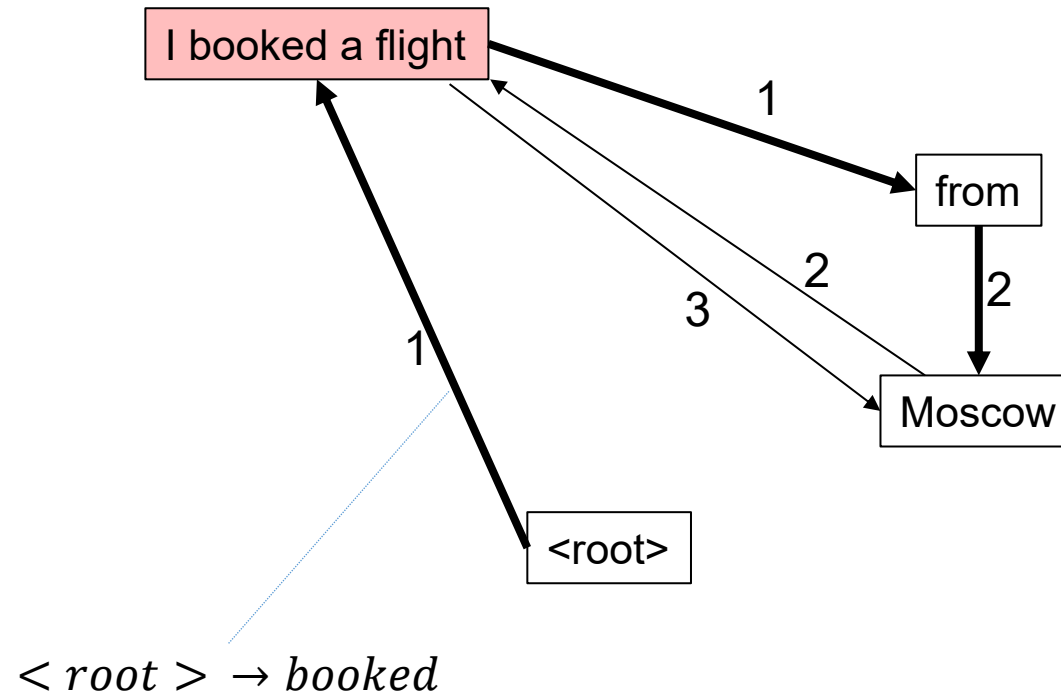
Алгоритм Эдмондса



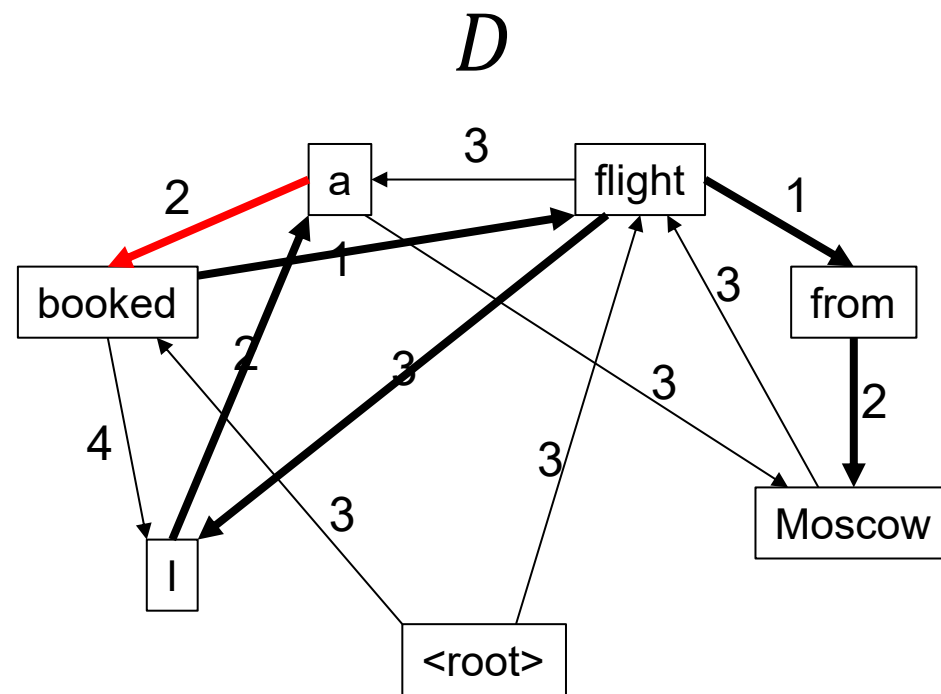
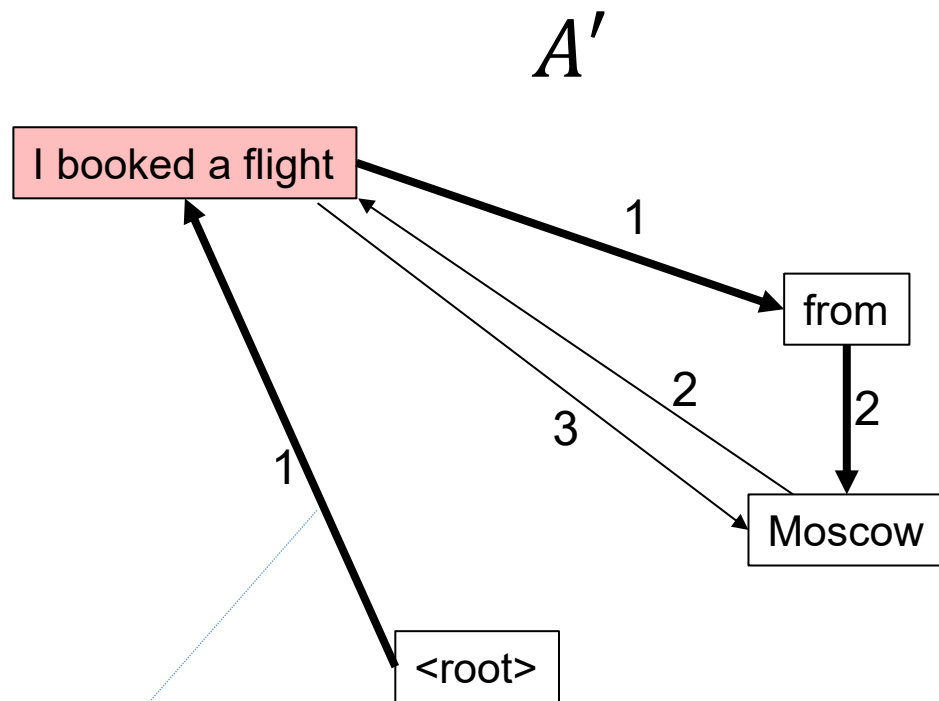
Алгоритм Эдмондса



Алгоритм Эдмондса



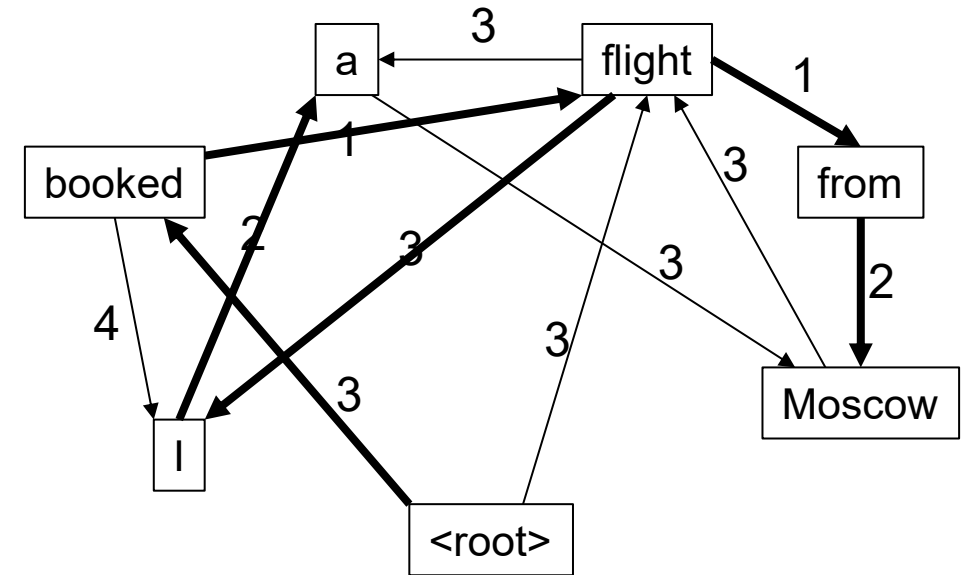
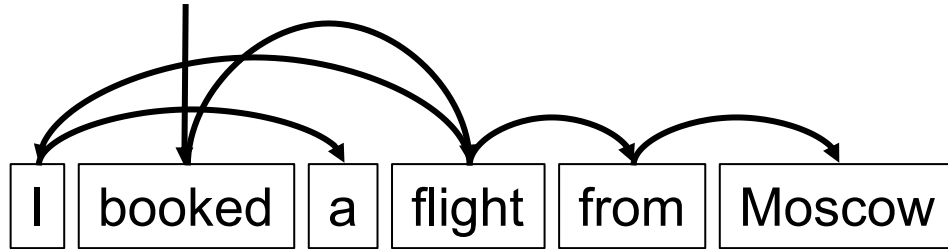
Алгоритм Эдмондса



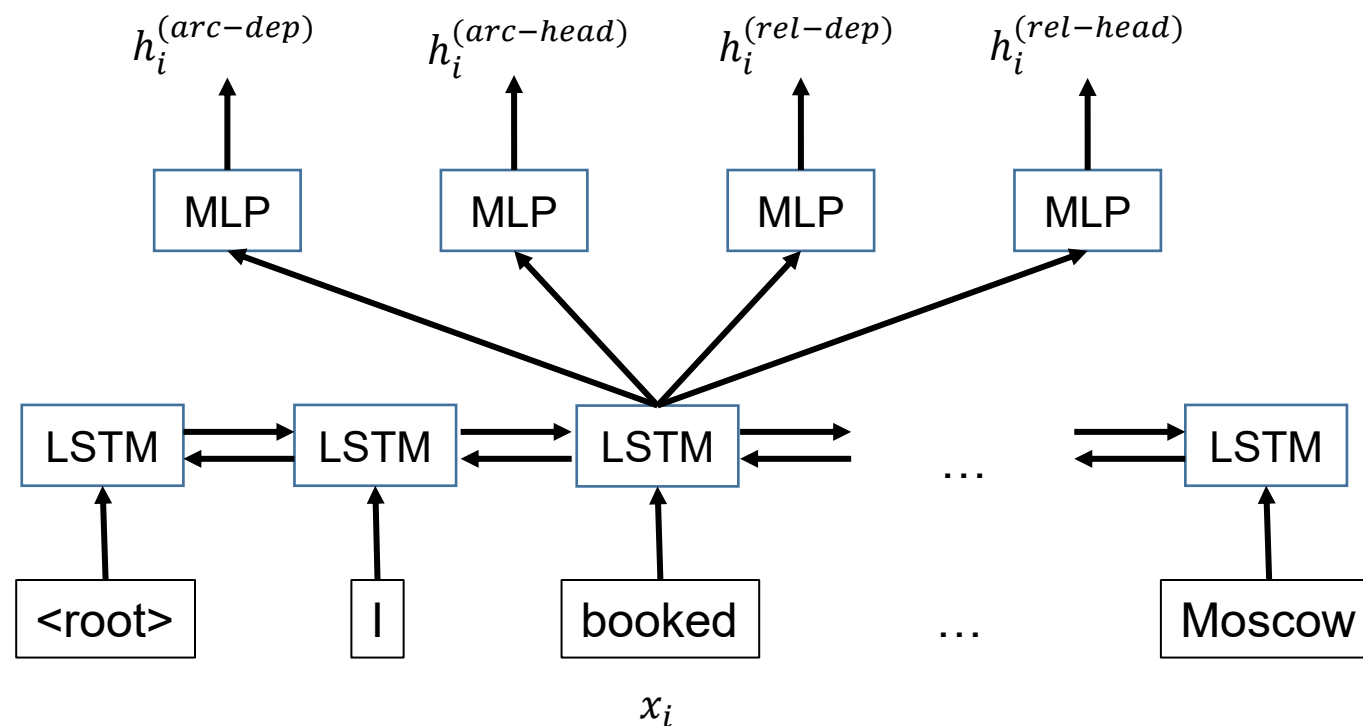
$\langle root \rangle \rightarrow booked$

Удалим ребро $(\pi(v), v)$ из C

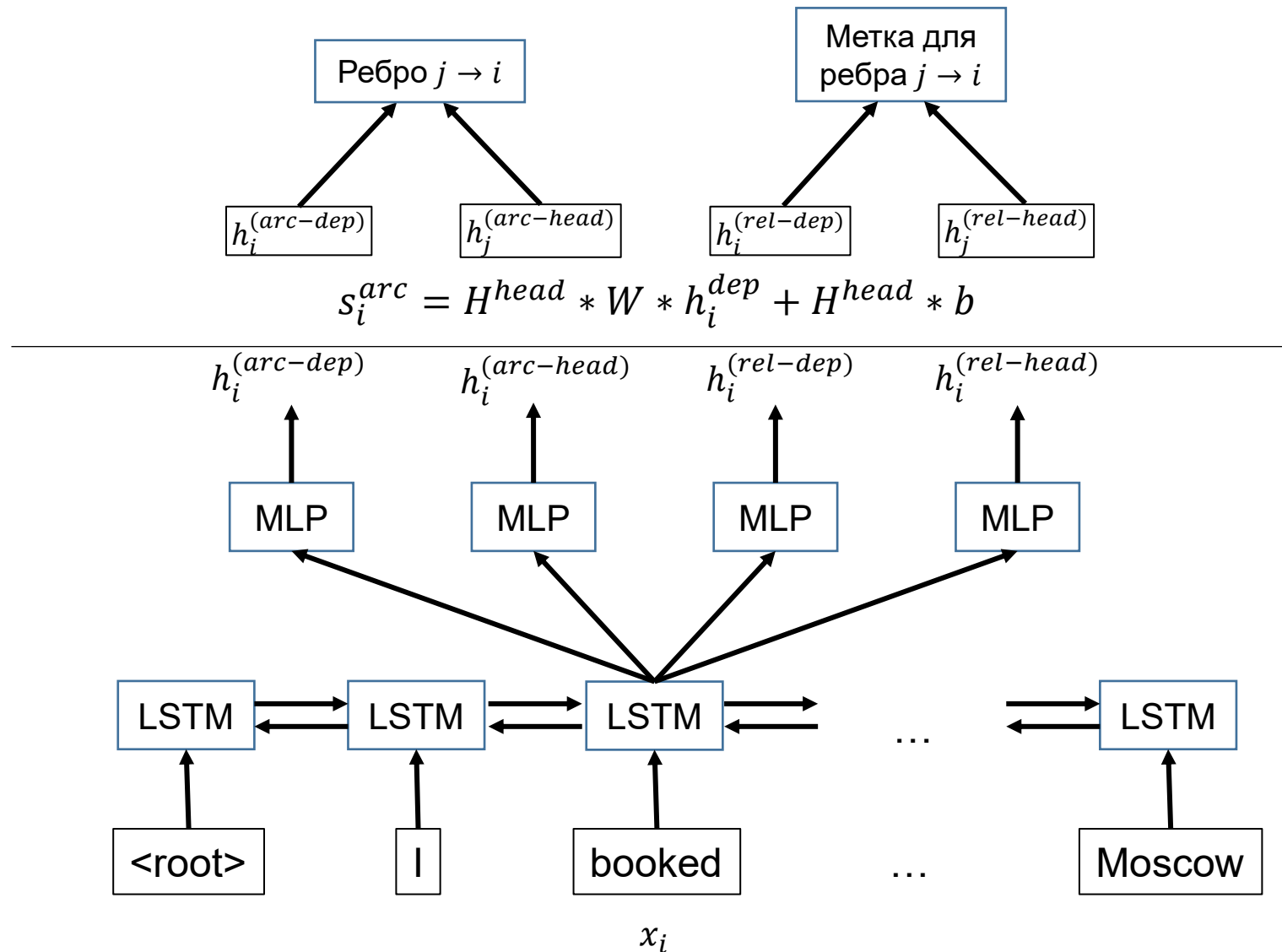
Алгоритм Эдмондса



Biaffine graph-based dependency parser



Biaffine graph-based dependency parser



Следующая лекция

Лексическая семантика