

# ТЕОРИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОРГАНИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Проф., д.х.н. Исляйкин Михаил Константинович

*В работе над электронным методическим сопровождением  
лекционного курса принимала участие студ.  
Чаленко Александра Сергеевна*

Целью дисциплины является изучение теоретических основ химико-технологических процессов тонкого органического, основного и нефтехимического синтеза.

Теоретический курс включает три раздела:

- Механизмы органических реакций.
- Кинетика и термодинамика органических реакций.
- Теоретические основы катализа.

# Структура дисциплины

## «Теория химико-технологических процессов органического синтеза»

Вид учебной работы	Всего часов
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	<b>85</b>
В том числе:	-
Лекции	<b>51</b>
Практические занятия (ПЗ)	<b>34</b>
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	<b>131</b>
Вид аттестации (зачет, экзамен)	<b>зач., экз.</b>
Общая трудоемкость, час.	<b>216</b>
зач.ед.	<b>6</b>

# ЛИТЕРАТУРА

## **Основная:**

1. Лебедев Н.Н., Манаков М.Н., Швец В.Ф. Теория химических процессов основного органического и нефтехимического синтеза. – М.: Химия, 1984. – 376 с. <http://www.twirpx.com/file/105004/>
2. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. – СПб.: Химиздат, 2007. – 944 с.
3. Сайкс П. Механизмы реакций в органической химии. М.: Химия, 1991. - 448с.
4. Кудрик Е.В., Колесников Н.А., Любимцев А.В. Теория химико-технологических процессов органического синтеза. Часть 1. Механизмы органических реакций. / Под ред. Г.П.Шапошникова. Иван. Гос. Хим.-технол. Ун-т. 2004. 156с.
5. Данов С.А., Наволокина Р.А. Примеры и задачи по теории химических процессов основного органического и нефтехимического синтеза: уче. пособие для студентов вузов специальности «ХТОВ» – Нижегород. гос. техн. ун-т. 2008. 272с.

# ЛИТЕРАТУРА

## Дополнительная:

1. Лисицин В.Н. Химия и технология промежуточных продуктов. - М.: Химия, 1987. - 376с.
2. Лисицын В.Н. Химия и технология ароматических соединений. Учебное пособие. М.: [ДеЛи принт](#). 2014, 391 с.
3. Эфрос Л.С., Квитко И.Я. Химия и технология ароматических соединений в задачах и упражнениях. Л.: Химия, 1984.
4. Теоретические основы органической химии; строение, реакционная способность и механизмы реакций органических соединений: Учебник / А. С. Днепровский, Т. И. Темникова. – 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1991. – 560 с.
5. Пассет Б.В. Основные процессы химического синтеза биологически активных веществ.: Учебник. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2002. 376с.
6. Исляйкин, М.К. Применение квантово-химических методов для описания свойств органических соединений: метод. указания/ М.К.Исляйкин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т - Иваново 2005. -44 с.
7. Эмануэль Н.И., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: ВШ, 1984. 464с.

8. Жоров Ю.М. Кинетика промышленных органических реакций. – М.: Химия, 1989. – 384 с.
9. Жоров Ю.М. Термодинамика химических процессов. Нефтехимический синтез, переработка нефти, угля и природного газа. – М.: Химия, 1985. – 464 с.
10. Бочкарев В.В. Теория химико-технологических процессов органического синтеза. Гетерофазные и гетерогенно-каталитические реакции. Учеб. пособие. Томск: изд. ТПУ, 2005. – 118 с.  
[http://portal.tpu.ru/SHARED/s/STASYA\\_LS/i\\_work/tcp/Tab1/educational\\_supplies.pdf](http://portal.tpu.ru/SHARED/s/STASYA_LS/i_work/tcp/Tab1/educational_supplies.pdf)
11. Интернет-ресурсы: <http://rushim.ru/books/books.htm>;  
[www.xumuk.ru](http://www.xumuk.ru).

# МЕХАНИЗМЫ ОРГАНИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Химические реакции рассматриваются как превращение исходных органических веществ в продукты при неизменности ядер атомов. При этом происходит перераспределение электронов и ядер, в результате чего образуются новые химические вещества.

Химические реакции могут осуществляться как в один элементарный акт (стадию) – простые реакции, так и через последовательность отдельных стадий – сложные реакции.

Если стабильные или нестабильные продукты лежат на пути превращения исходных веществ в конечные, т. е. являются промежуточными, а не побочными, то реакция может быть разбита на ряд элементарных стадий, каждая из которых характеризуется энергией активации и переходным состоянием.

Знание расположения атомов в переходном состоянии, природы взаимодействия, способов разрыва/образования связей, энергии системы в каждый данный момент времени дает представление о механизме элементарных стадий, а совокупность знаний о механизме элементарных стадий дает представление о механизме реакции в целом.

Таким образом, понятие «механизм реакции» разбивается на две составляющие:

1. **Для сложной реакции**, это совокупность элементарных стадий в результате которых исходные вещества превращаются в продукты.
2. **Для простой реакции**, которая не разлагается на более простые, механизм реакции заключается в выявлении физических процессов, составляющих сущность химического превращения.

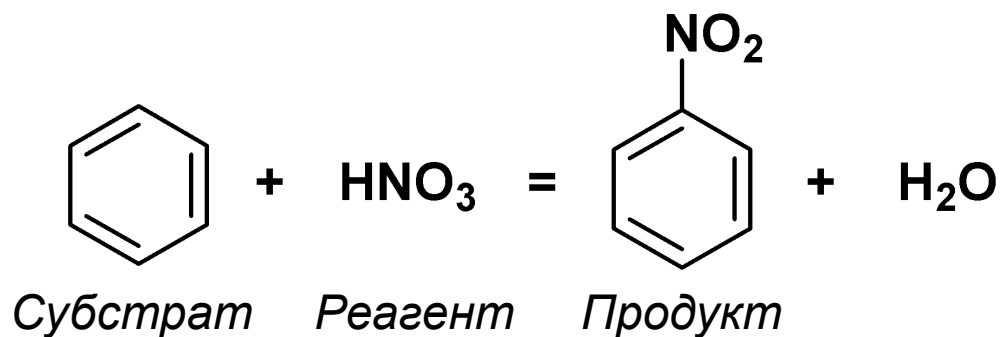
В случае ***сложных реакций*** наиболее медленно протекающая стадия определяет скорость всего процесса.



# Основные определения

Органическую реакцию рассматривают как взаимодействие органического соединения с реагентом.

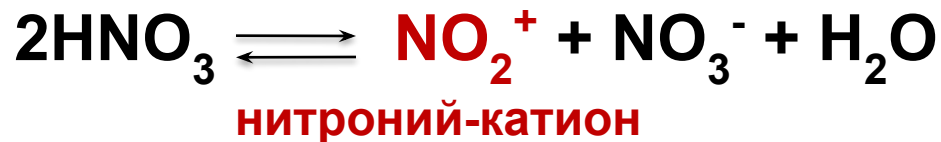
Например, реакция нитрования:



**Субстрат** – вещество, подвергающееся химическому превращению.

**Реагент** – вещество, под действием которого субстрат подвергается химическому превращению.

Как правило, химические превращения осуществляет не сам реагент, а **атакующие частицы**, которые из него образуются:

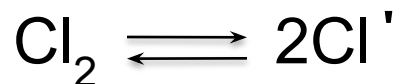


В зависимости от проявляемой реакционной способности различают следующие реагенты (атакующие частицы) :

**электрофильные** – частицы с пониженной электронной плотностью на реакционном центре; содержат либо целый положительный заряд, либо электронодефицитный атом углерода или гетероатом:  $\text{NO}_2^+$ ,  $\text{SO}_3$  и др.

**нуклеофильные** – характеризуются повышенной электронной плотностью на реакционном центре (анионы – частицы несущие целый отрицательный заряд), либо частицы содержащие атомы с неподеленной парой электронов:  $\text{OH}^-$ ,  $:\text{NR}_3$  и др.

**радикальные** – имеют неспаренный электрон на  $\sigma$ - или  $\pi$ -орбиталях; образуются в результате *гомолитического разрыва* ковалентной связи:



# Классификация органических реакций

## Классификация органических реакций по способу образования/разрыва связей:

1. Гомолитические. Ковалентная связь образуется в результате обобщения двух электронов, причем каждый атом, участвующий в образовании связи, поставляет один электрон (коллигация) :



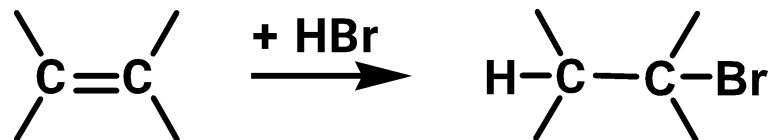
2. Гетеролитические. Ковалентная связь образуется в результате взаимодействия пары электронов одного атома с вакантной орбиталью другого (координация). К гетеролизу относится процесс разрыва ковалентной связи, сопровождающийся образованием ионов  $\ddot{\text{A}}^- + \text{B}^+$ .



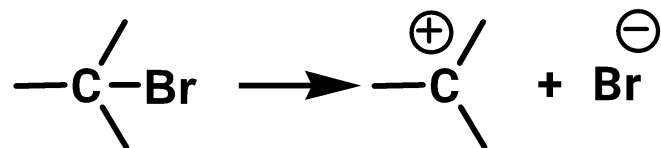
# Классификация органических реакций, основанная на брутто-схемах, общих представлениях об образовании связей и природе атакующих частиц

## А. Классификация по *брутто-схемам*:

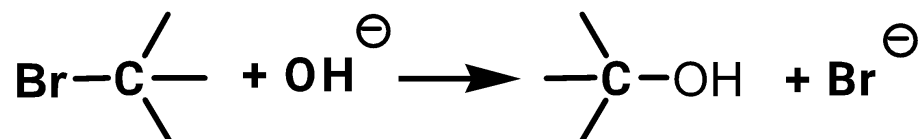
### 1. Реакции присоединения (Addition, **Ad**):



### 2. Реакции отщепления (Elimination, **E**):

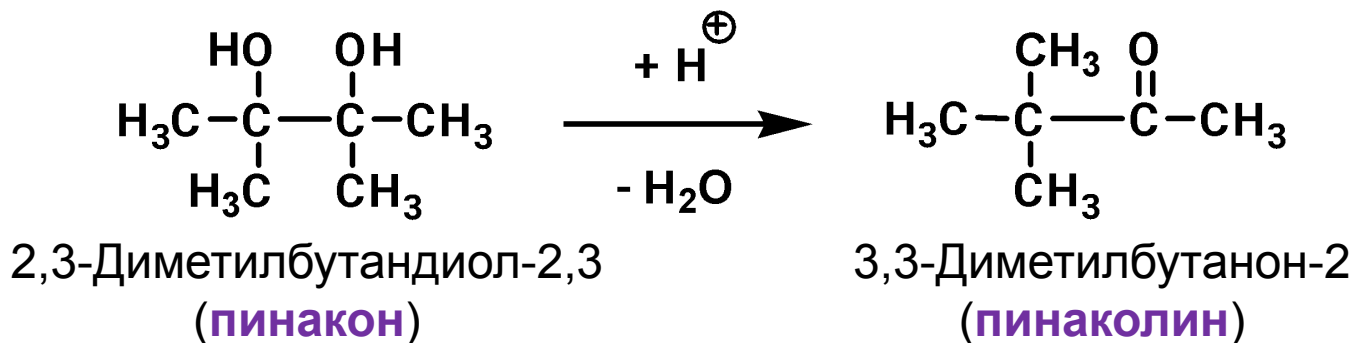


### 3. Реакции замещения (Substitution, **S**):



4. Перегруппировки. Протекают через образование TS, представляющих собой катион/анион/радикал (обычно карбокатион/карбоанион). При перегруппировках может происходить существенная перестройка углеродного остова.

Например, пинаколиновая перегруппировка:



**Б.** Дальнейшая детализация классификаций органических реакций проводится с учетом **природы реагента** (атакующей частицы). Например, реакции, протекающие под действием электрофилов, называют **электрофильными** (E).

Тип реагента	Название реакции	Обозначение
Электрофил	Электрофильная	E
Нуклеофил	Нуклеофильная	N
Радикал	Радикальная	R

**В.** Количество частиц, участвующих на стадии, определяющей скорость реакции в целом:

- мономолекулярная реакция 1;
- бимолекулярная реакция 2.

Обозначение органических реакций строят следующим образом:



где А – обозначение брутто-схемы, по которой протекает реакция;

Б – природа атакующей частицы;

В – молекулярность реакции.

Например, реакция нуклеофильного присоединения второго порядка:  $Ad_N2$ , электрофильного замещения:  $S_E2$ , нуклеофильного замещения:  $S_N1$ ,  $S_N2$ , радикального присоединения:  $Ad_R1$ .

В случае реакций *ароматических соединений*, протекающих по ароматическому ядру, к этому обозначению принято добавлять индекс **Ar**, например,  $S_E2Ar$ .

Существуют также и другие классификации, например, по **характеру реагентов и продуктов реакции:**

- сульфирование
- нитрование
- восстановление
- хлорирование
- алкилирование
- diazotирование
- азосочетание и др.

# Взаимное влияние атомов в молекулах органических соединений

**Углеводороды** – это органические соединения, построенные из атомов углерода и водорода.

**Заместители** (функциональные группы) – атомы или группы атомов, являющиеся структурными фрагментами органических молекул и замещающие атомы водорода.

Заместители подразделяются на

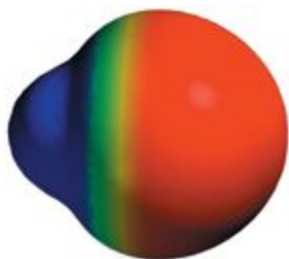
моноатомные	многоатомные
-F, -Cl, -Br, -I, -O <sup>-</sup> и др.	-OH, -NO <sub>2</sub> , -SO <sub>3</sub> H и др.

Заместители проявляют электронные и пространственные эффекты и во многом определяют химические свойства веществ (кислотность, основность, реакционную способность и т.д.), что обусловило появление термина **«функциональные группы»**.

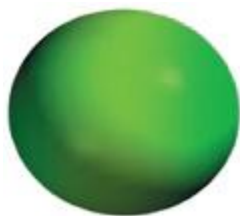
При наличии в молекуле нескольких заместителей имеет место их взаимодействие через проявляемые ими эффекты, что существенно влияет на химические свойства органических соединений.



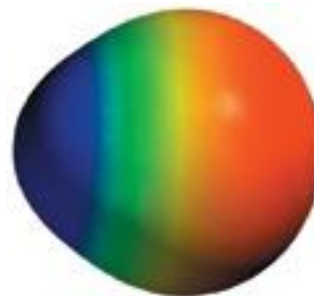
# Электронные эффекты



LiH



H<sub>2</sub>



HF

В том случае, когда 2 одинаковых атома связаны ковалентной связью А-А, электронная плотность распределена равномерно между ними.

Если электронная плотность ковалентной связи А-В смещена в сторону атома А, то А – более электроотрицателен, чем В. Причем, чем полярнее связь А-В, тем выше электроотрицательность атома А по сравнению с В. Таким образом, электроотрицательность характеризует способность атома поляризовать ковалентную связь.

В настоящее время известно несколько подходов к оценке электроотрицательности атомов. Однако наиболее распространенной является шкала электроотрицательности по Полингу.

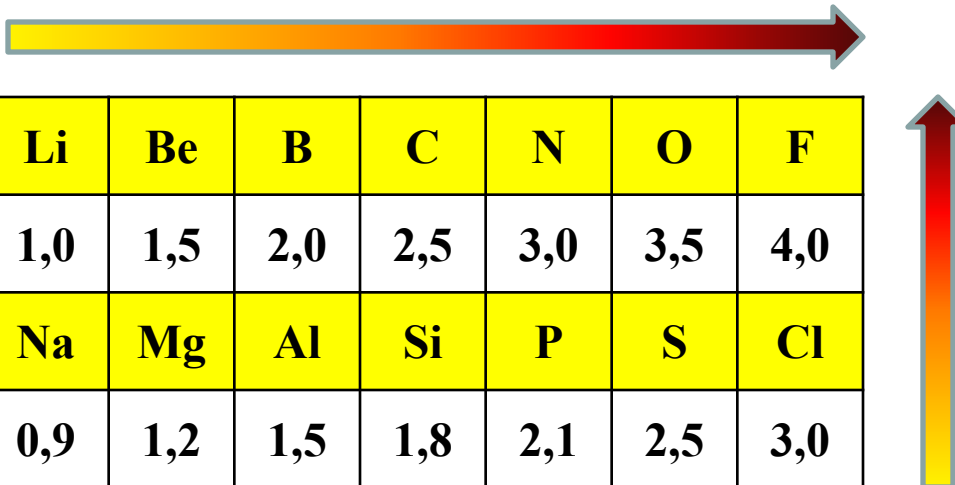
Разность электроотрицательностей двух атомов А и В ( $\chi_A$  и  $\chi_B$ ) определяется по формуле:

$$\chi_A - \chi_B = \left| 0.208\sqrt{\Delta} \right|,$$

где  $\Delta = E_{AB} - 0,5 \cdot (E_{AA} - E_{BB})$

$E_{AB}$ ,  $E_{AA}$ ,  $E_{BB}$  – энергии связей А–В, А–А, В–В соответственно.

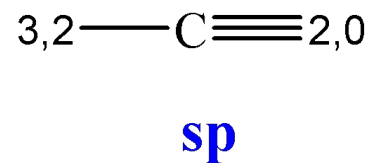
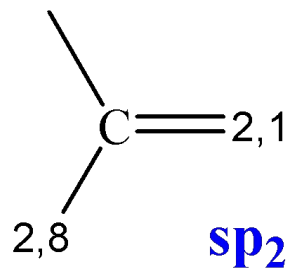
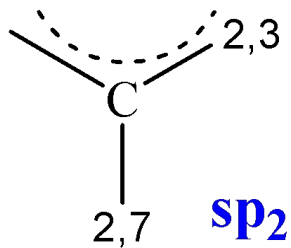
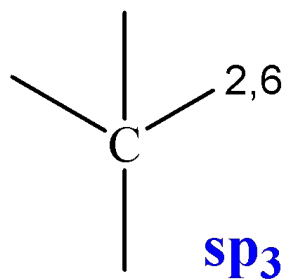
**Средние значения относительных атомных электроотрицательностей по Полингу**



<b>Атом</b>	<b>H</b>	<b>Li</b>	<b>Be</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>
$\chi_A$	2,1	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
<b>Атом</b>		<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>
$\chi_A$		0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	3,0

Электроотрицательность зависит от эффективного заряда атома в конкретной молекуле и от состояния его гибридизации.

Рассмотрим атом **C**.



Электроотрицательности ( $\chi_{II}$ ) заместителей

Группа	$-C\equiv N$	$-C\equiv CH$	$-COOH$	$-CH=O$	$-CH_3$	$-CF_3$	$-CCl_3$	$-CBr_3$
$\chi_{II}$	3,46	3,10	3,15	2,89	2,32	3,46	2,89	2,72

Есть и другие шкалы. Например, электроотрицательность по Малликену рассчитывается по формуле:

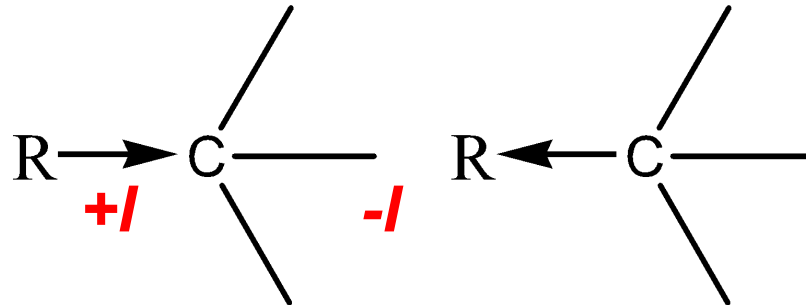
$$\chi_M = \frac{1}{2} \cdot (I - E)$$

где  $I$  – потенциал ионизации (эВ),  $E$  – сродство к электрону (эВ).

# Индуктивный эффект

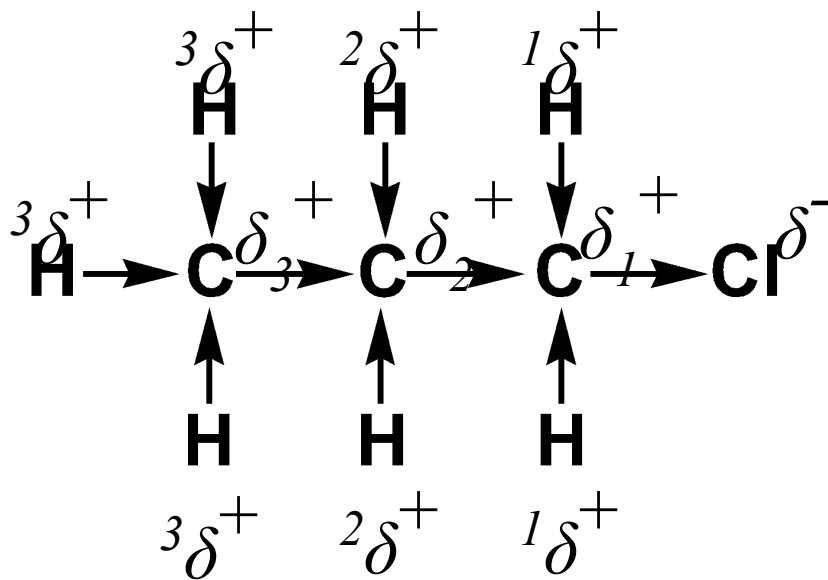
Последовательная поляризация  $\sigma$ -связей, проходящая под влиянием заместителя, называется индуктивным эффектом.

Если заместитель R поляризует ковалентную связь, смещая электронную плотность к другому атому, то такой эффект называют положительным индуктивным эффектом (+I). Если электронная плотность смещается к заместителю, то такой эффект называется отрицательным индуктивным эффектом (-I).



Индуктивный эффект быстро ослабевает и на четвертом-пятом атоме углеродной цепи практически не проявляется. Например, 1-хлорпропан.

$$\chi_{\text{Cl}} > \chi_{\text{C}}$$



$$\delta^- = \sum \delta_i^+$$

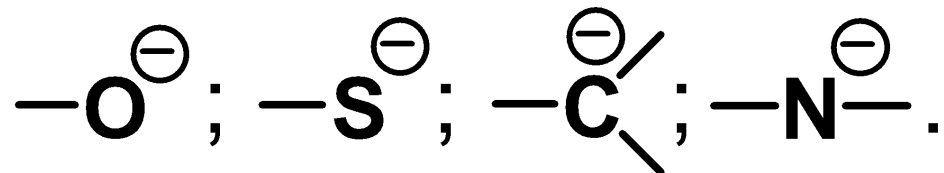
$$\delta_1^+ > \delta_2^+ > \delta_3^+$$

Величина индуктивного эффекта определяется разностью электроотрицательностей заместителя и атома, с которым образуется ковалентная связь.

По характеру производимых индуктивных эффектов заместители объединяют в следующие группы:

1) с сильно выраженным +I-эффектом.

Группы, имеющие целый отрицательный заряд.



2) с выраженным +I-эффектом.

Металлы, расположенные левее водорода в ряду активности:

Na-, K- и т.д.

CInHg-, (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Si- и т.д.

-CH<sub>3</sub>; -CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>; -CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; -C(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.

Электронная плотность смещается с заместителя к углеродной цепи.

Электронная плотность смещается к заместителю от углеродной цепи

3) выраженным -I-эффектом обладают:

Галогены:  $-F > -Cl > -Br > -I$ ;

Заместители, содержащие гетероатом(ы):

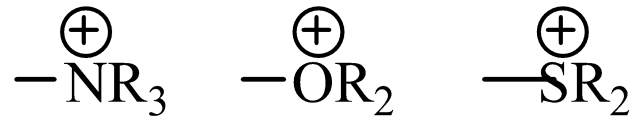
$-NR_2$ ,  $-OR$ ,  $R = H, Alk, Ar...$

$-NO$ ;  $-NO_2$ ;  $-C\equiv N$ ;

$-COX$ ,  $-SO_2X$ ,  $X = -H, -Cl, -OH, -OAlk, -NR_2, ...$

$-CH=CH_2$ ;  $-C\equiv CH$ ; ...

4) заместители с сильно выраженным -I-эффектом:



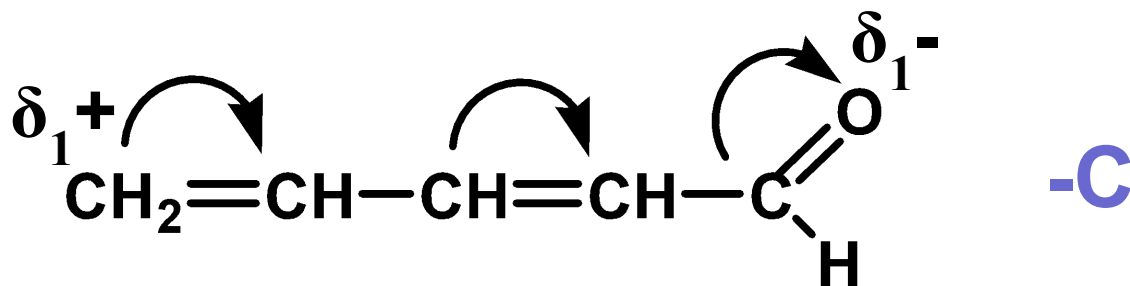
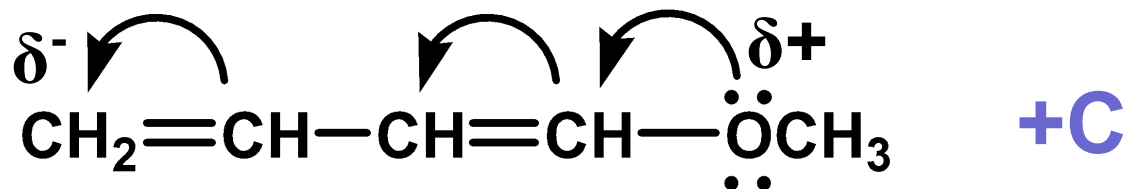
$R = -H, -Alk, -Ar, ...$



## Эффект сопряжения (С)

**Эффект сопряжения** (мезомерный эффект) (С) – вид взаимного влияния атомов в молекуле или ионе, заключается в статической поляризации сопряженной системы связей. Его проявляют заместители, имеющие π-связи, атомы с неподеленными парами электронов или низколежащими вакантными р-орбиталями.

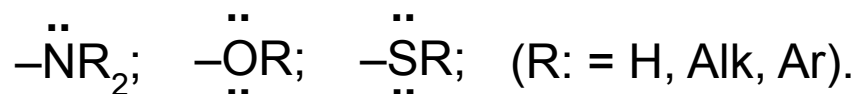
Знак эффекта сопряжения, проявляемого заместителем, определяется направлением смещения π-электронной плотности: если электронная плотность смещается от заместителя к системе сопряжения, то такой эффект обозначают +С. Если, наоборот, от системы сопряжения на заместитель, от –С.



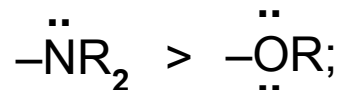
В отличие от индуктивного эффекта, который существенно уменьшается по мере удаления от заместителя, эффект сопряжения (С) передается без заметного затухания в протяженных системах сопряжения.

Относительная величина и знак С-эффекта определяется природой заместителя.

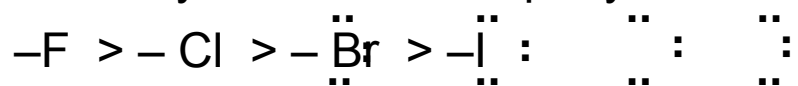
**+С-эффект** проявляют заместители, имеющие неподеленную пару электронов на атоме, непосредственно связанном с системой сопряжения:



Взаимодействие неподеленной пары электронов с π-электронным ансамблем молекулы приводит к увеличению π-электронной плотности в системе сопряжения и сопровождается ее поляризацией. Величина +С зависит от электроотрицательности атома, несущего неподеленную пару электронов: чем ниже электроотрицательность, тем больший +С проявляет заместитель.

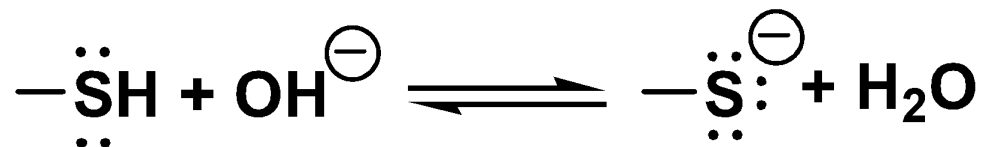
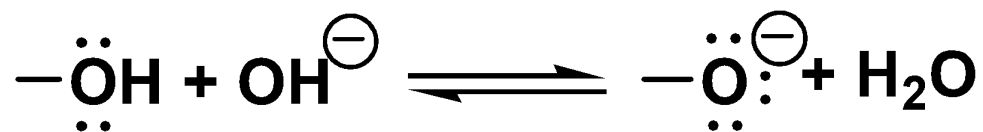


Для галогенов +С уменьшается в ряду:

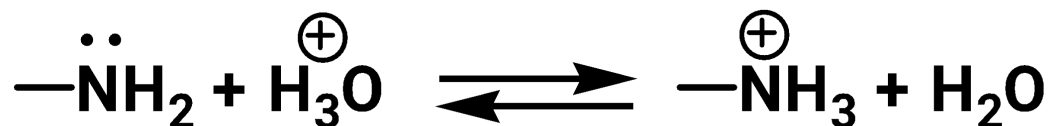


Это объясняется тем, что  $2p_z$  орбиталь фтора более эффективно перекрывается с  $2p_z$  орбиталью углерода, чем  $3p_z$  хлора с  $2p_z$  углерода и т.д.

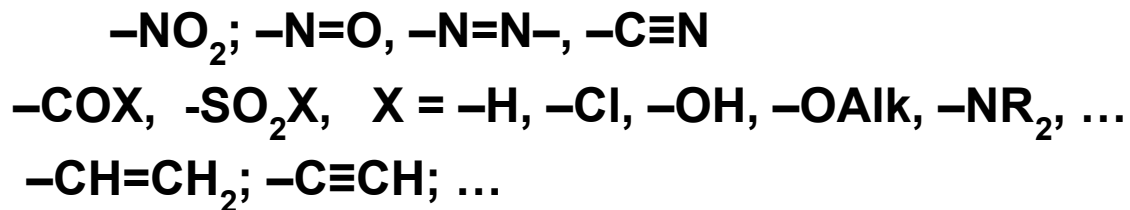
В результате ионизации  $-\text{OH}$  и  $-\text{SH}$  +С-эффект значительно увеличивается, т.к. на заместителе образуется целый отрицательный заряд, в результате чего его электронодонорные свойства резко возрастают:



При ионизации  $-\text{NH}_2$  отмечается значительное уменьшение +С-эффекта (на атоме азота появляется положительный заряд и неподеленная пара электронов расходуется на образование связи с протоном):

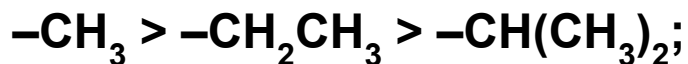


**-С-эфффе́ктом** обладают заместители, имеющие полярную кратную связь, которая включается в систему сопряжения. π-Электронная плотность смещается в направлении заместителя.



-С-эффе́кт также проявляется у заместителей с атомом, имеющим низко лежащую вакантную (d) орбиталь (бор,  $\text{C}^+$ ).

Алкильные заместители могут проявлять эффект, называемый **гиперсопряжением** ( $+\text{C}_{\text{гип}}$ ). Этот эффект вызван тем, что  $sp_3$  орбитали углерода, формирующие  $\sigma$ -связи C–H, способны частично перекрываться с  $p_z$ -орбиталью атома углерода сопряженной системы. При этом величина  $+\text{C}_{\text{гип}}$  пропорциональна числу связей C–H у атома C, подключенного непосредственно к системе сопряжения.



*трет*-Бутильная группа  $-\text{C}(\text{CH}_3)_3$  не проявляет  $+\text{C}_{\text{гип}}$ , т.к. четвертичный атом углерода не содержит связей с атомом водорода.

