

Министерство образования и науки РФ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Московский физико-технический институт (национальный  
исследовательский университет)»  
Факультет общей и прикладной физики  
Образовательная программа "Вычислительная физика конденсированного состояния  
и живых систем"

**Влияние конформации остатка пролина на  
структурно-динамические характеристики  
трансмембранного домена рецептора инсулина**

Диплом на соискание степени бакалавра

**Выполнила:**

студентка 626 группы  
Щекотихина Дарья Денисовна

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
Ефремов Роман Гербертович

Москва 2020

# Аннотация

Данная работа посвящена исследованию роли конформации пептидной связи пролина в трансмембранном домене рецептора инсулина в контексте механизма активации рецептора.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Обзор литературы</b>	<b>5</b>
2.1	Рецептор инсулина . . . . .	5
2.1.1	Модели активации IR . . . . .	6
2.2	Трансмембранный домен IR . . . . .	7
2.2.1	Экспериментальные данные . . . . .	7
2.2.2	Данные моделирования . . . . .	7
2.3	Пролин в трансмембранных $\alpha$ -спиралях . . . . .	8
2.3.1	Влияние пролина на свойства спирали . . . . .	8
2.3.2	Цис-транс изомеризация . . . . .	8
2.4	Компьютерное моделирование биологических молекул . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Материалы и методы</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Результаты и обсуждение</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Выводы</b>	<b>12</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>13</b>

# 1 Введение

TO-DO

## 2 Обзор литературы

### 2.1 Рецептор инсулина

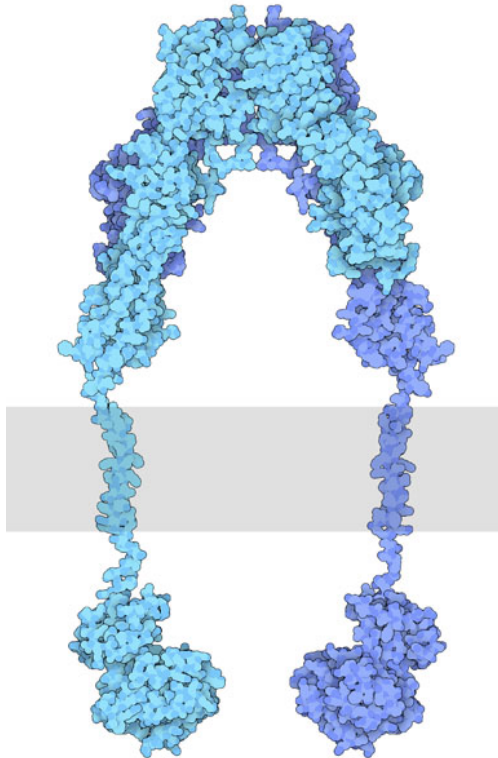


Рис. 1: ??? (Какое?) изображение IR. Внеклеточный домен изображен сверху; внутриклеточный (киназный домен) изображен снизу; мембрана схематично показана серым цветом. <https://pdb101.rcsb.org/motm/182>

Инсулиновый рецептор (IR) - это рецептор, связывающийся с молекулой инсулина. Он принадлежит обширному классу тирозинкиназных рецепторов и представляет собой трансмембранный белок, представленный в виде димера.

В рецепторе инсулина выделяют внеклеточный, трансмембранный и внутриклеточный (киназный) домены (см рис. 1). Внеклеточный домен связывается с инсулином, трансмембранный домен передает сигнал от внеклеточного домена к киназному, киназный домен запускает каскад реакций внутри клетки.

Роль IR в организме заключается в регуляции гомеостаза глюкозы. Этот процесс можно кратко описать следующим образом:

- Пища поступает в организм, вследствие расщепления углеводов происходит повышение уровня глюкозы в крови.
- В ответ на повышение уровня глюкозы вырабатывается гормон инсулин.
- Инсулин связывается с внеклеточным доменом рецептора

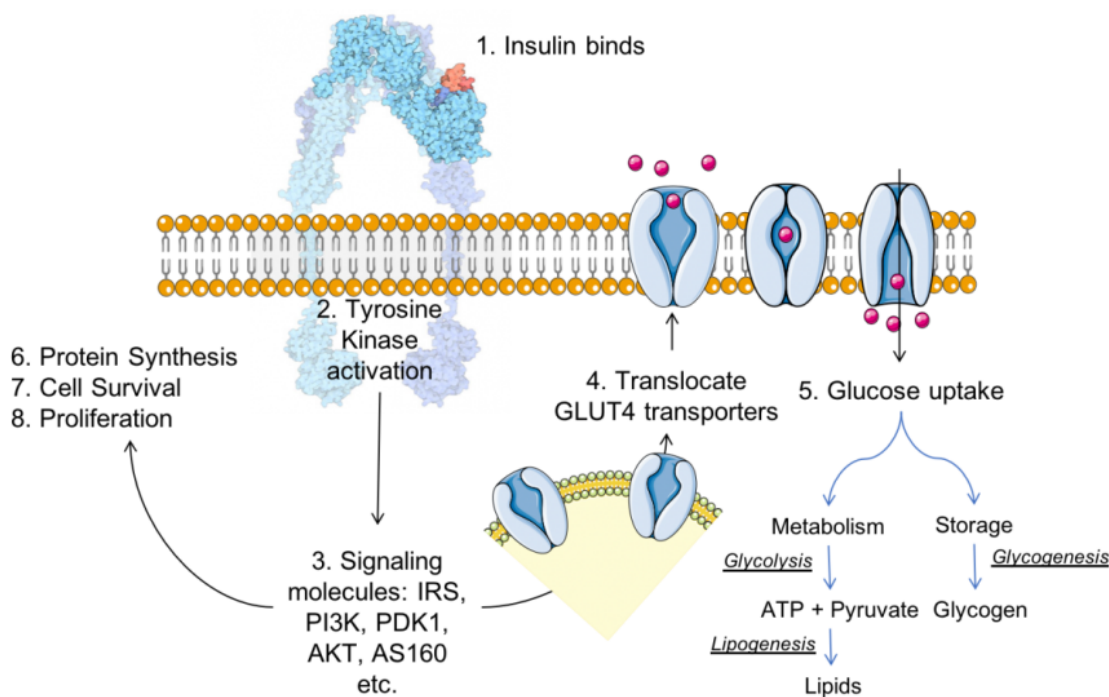


Рис. 2: Схема каскада реакций, запускаемых рецептором инсулина (синий) в результате связывания с инсулином (красный). <https://pdb101.rcsb.org/global-health/diabetes-mellitus/drugs/insulin/insulin-receptor>

- Происходит передача сигнала внутрь клетки - к внутриклеточному домену.
- Киназный домен запускает каскад реакций, приводящий к увеличению завата глюкозы клеткой. Вследствие этого уровень глюкозы в крови понижается.

Поскольку рецептор отвечает за столь важный процесс в организме человека, нарушения в его работе приводят к различным клиническим проявлениям, в том числе к диабету. Поэтому процесс активации IR - это актуальный вопрос современной биохимии. Знание этого процесса на молекулярном уровне может послужить базой для создания лекарств на основе структуры белка (Structure-based drug design (TO-DO add reference to some article??)).

### 2.1.1 Модели активации IR

В то время как для внеклеточного и киназного доменов возможно подробное исследование экспериментальными методами, в том числе с помощью сгусто ЕМ [1], трансмембранный домен представляет особую сложность из-за необходимости создания липидного окружения. Поэтому были предложены разные механизмы активации IR [2] (см рис. 3).

На данный момент общепринятой моделью, подтверждающейся экспериментальными данными, является предложенная Lee [3] (см рис. 3С). В данной модели ТМ домены

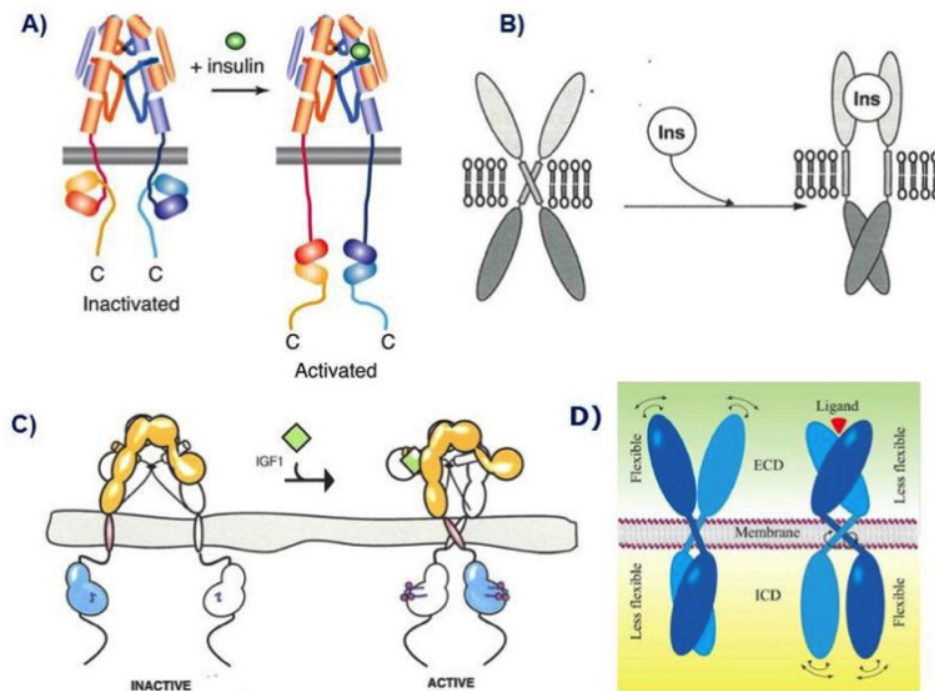


Рис. 3: Models of the mechanism of ligand activation of the insulin receptor tyrosine kinase. A: The "yo-yo" model. B: The TM domain ligand-induced separation model. C: The TM domain ligand-induced approximation model. D: The "rotation model". [2]

оказываются достаточно свободными и подвижными в мембране, чтобы иметь возможность самодимеризации. Далее, из-за такого изменения конформации ТМ участка, киназный домен переходит в активированное состояние.

Таким образом, ввиду особой сложности для эксперимента, в изучении ТМ домена особый интерес представляют методы компьютерного моделирования. Они позволяют на базе неполных структурных данных проверять теоретические предположения на основе оценки стабильности структур, а так же получать представление о динамике полученных структур в модельном окружении (см. раздел 2.4).

## 2.2 Трансмембранный домен IR

### 2.2.1 Экспериментальные данные

Структурные данные - эксп. в мицеллах

ТО-ДО добавить инфу про ямр эксперимент ИБХ

### 2.2.2 Данные моделирования

ТО-ДО добавить инфу про посчитанные димеры

## 2.3 Пролин в трансмембранных $\alpha$ -спиралях

### 2.3.1 Влияние пролина на свойства спирали

Принято считать, что остаток пролина в трансмембранных спиралях играет функциональную роль. На это указывает сравнительно высокая встречаемость пролина в трансмембранных спиралях по сравнению со спиралями водорастворимых белков [4], [5]. Кроме того, было показано, что внесение мутаций в Pro в ТМ домене транспортных белков приводит к деактивации их механизма действия [6]. Все это дает основание полагать, что пролин играет ключевую роль в механизме действия трансмембранных доменов большого количества белков.

Как компьютерное моделирование, так и экспериментальные данные показывают, что пролин вносит конформационные изменения в геометрию ТМ  $\alpha$ -спирали [8], [7]. Цис- конформация пептидной связи между XXX-Pro создает так называемый "кинк" в  $\alpha$ -спирали, что может изменять ее ориентацию в мембране и, как следствие, меняет функциональные свойства пептида. Структуры с кинками отслеживаются в эксперименте наряду с обычными прямыми спиралями, что позволяет говорить о существовании обеих конформаций.

Также было замечено, что пролин в трансмембранных спиралях имеет достаточно консервативное положение: он чаще всего оказывается "вытащен" в область гидрофильных головок [9]. Такое специфическое положение в свою очередь имеет связь с процессом димеризации ТМ спиралей. Так, с помощью поиска мотивов, образующих водородные связи в димерах, было исследовано, что пролин, находящийся в гидрофильной области ТМД (трансмембранного домена) индуцирует димеризацию мономеров в мембране [10]. Этот факт вызывает особый интерес в контексте изучения механизма работы ТМД в инсулиновом рецепторе.

### 2.3.2 Цис-транс изомеризация

В исследовании цис-транс конформаций  $\alpha$ -спиралей в мембранах особняком стоит вопрос о цис-транс изомеризации. В эксперименте тяжело зафиксировать конформационный переход, меняющий геометрию пептида в связи с необходимостью накопления данных от множества пептидов. Моделирование транс-цис перехода вычислительными методами также является трудоемкой задачей, требующей введения более сложных силовых полей. Это приводит к недостатку данных о возможности, а также роли цис-транс изомеризации в работе ТМД.

Так же сложность в вопрос конформационного изменения вносит энергия перехода. Если в мембранной спирали происходит подобное изменение с образованием кинка посередине, то дополнительно к энергии изомеризации пептидной связи добавится энер-



гия поворота участка  $\alpha$ -спирали в мембране. Это наличие избыточной энергии может являться причиной того, что пролины преимущественно оказываются в гидрофильной области, т.к. в таком случае исчезает проблема поворота участка спирали в мембране.

Несмотря на сложности в получении данных, известны рецепторы, в которых цис-транс изомеризация, приводящая к конформационным изменениям, является механизмом передачи сигнала, к примеру рецептор родопсин, в котором поглощение кванта света дает энергию изомеризации. Также подобные изменения в ТМ спиралях показаны в ионных каналах с помощью мутагенеза пролина [11].

## **2.4 Компьютерное моделирование биологических молекул**

TO-DO

### 3 Материалы и методы

## 4 Результаты и обсуждение

## 5 Выводы

## Список литературы

- [1] Uchikawa E, Choi E, Shang G, Yu H, Bai XC. Activation mechanism of the insulin receptor revealed by cryo-EM structure of the fully liganded receptor-ligand complex *Elife*. 2019; 2019 Aug 22.
- [2] De Meyts P. The insulin receptor and its signal transduction network. In: De Groot LJ, Chrousos G, Dungan K, Feingold KR, Grossman A, Hershman JM, Koch C, Korbonits M, Mclachlan R, New M, Purnell J, Rebar R, Singer F, Vinik A, editors. *Endotext* [Internet]. South Dartmouth, MA: MDText.com, Inc. (2000).
- [3] Lee J, Miyazaki M, Romeo GR and Shoelson SE. Insulin receptor activation with transmembrane domain ligands. *J Biol Chem* 289: 19769-19777 (2014)
- [4] Woolfson DN, Mortishire-Smith RJ, Williams DH. Conserved positioning of proline residues in membrane-spanning helices of ion-channel proteins. *Biochem Biophys Res Commun* 1991; 175: 733–737
- [5] Alex Peralvarez-Marin, Jose-Luis Bourdelande, Enric Querol, Esteve Padros (2006) The role of proline residues in the dynamics of transmembrane helices: the case of bacteriorhodopsin, *Molecular Membrane Biology*, 23:2, 127-135
- [6] Slepko ER, Chow S, Lemieux MJ, Fliegel L. Proline residues in transmembrane segment IV are critical for activity, expression and targeting of the Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> exchanger isoform 1. *Biochem J* 2004; 379: 31–38
- [7] Cordes FS, Bright JN, Sansom MSP. Proline-induced distortions of transmembrane helices. *J Mol Biol* 2002; 323: 951–960
- [8] L.K. Iyer, S. Vishveshwara A model for transmembrane helix with a cis-proline in the middle *FEBS Lett.*, 374 (1995), pp. 21-24
- [9] D.N. Woolfson, R.J. Mortishire-Smith, D.H. Williams Conserved positioning of proline residues in membrane-spanning helices of ion-channel proteins *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 175 (1991), pp. 733-737
- [10] N. Sal-Man, D. Gerber, Y. Shai Proline localized to the interaction interface can mediate self-association of transmembrane domains *Biochim. Biophys. Acta - Biomembr.*, 1838 (2014), pp. 2313-2318
- [11] Lummis, S., Beene, D., Lee, L. et al. Cis–trans isomerization at a proline opens the pore of a neurotransmitter-gated ion channel. *Nature* 438, 248–252 (2005)