

Клиническая патофизиология и анатомия острой боли

А. М. Овечкин

Первый московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова

Clinical pathophysiology and anatomy of acute pain

A. M. Ovechkin

I. M. Sechenov First Moscow State Medical University

Определение острой боли

Согласно определению Международной ассоциации по изучению боли (IASP), **боль представляет собой неприятное ощущение и эмоциональное переживание, связанное с имеющимся или вероятным повреждением тканей, или же описываемое пациентом терминами подобного повреждения.** Данное определение подразумевает вербальный контакт с пациентом, в то же время отсутствие подобного контакта (пациенты без сознания или с тяжелыми нарушениями интеллекта) не означает, что пациент не испытывает боли и не нуждается в обезболивании.

Острая боль обычно определяется как боль, недавно начавшаяся и (вероятнее всего) ограниченная по продолжительности, по времени возникновения и локализации болевых ощущений, связанная с заболеванием или травмой. Хроническая боль сохраняется и после заживления раны или окончания заболевания в течение длительного времени (иногда на протяжении всей жизни пациента), а в ряде случаев невозможно установить причину ее возникновения.

Интенсивная острая боль с течением времени может стать хронической. Понимание патофизиологических механизмов острой боли способствует повышению качества ее лечения и предотвращению трансформации в хроническую форму.

Ноцицепция

Ноцицепция – это комплексный нейрофизиологический процесс генерации активности периферических афферентных волокон, индуцированный разнообразными стимулами повреждающей интенсивности, с последующей передачей ноцицептивной информации в спинальные структуры и кору головного мозга. В нем выделяют четыре основные стадии:

- **Трансдукция** – активация специализированных нервных окончаний (ноцицепторов), формирование потенциала действия.
- **Трансмиссия** – проведение потока ноцицептивных стимулов из периферических тканей в структуры спинного мозга и далее в супраспинальные центры и кору головного мозга.
- **Модуляция** – подавление интернейронами II пластины задних рогов спинного мозга высвобождения нейротрансмиттеров из ноцицептивных нейронов, т. е. препятствие активации нейронов 2-го порядка.
- **Перцепция** – кульминация вышеуказанных процессов, локализация и осознанное восприятие боли корой головного мозга, формирование эмоционально-аффективного компонента.

Трансдукция

Периферические ноцицепторы

Восприятие ноцицептивных стимулов начинается с активации периферических сенсорных образований (ноцицепторов), которая трансформируется в потенциал действия (трансдукция) для последующей передачи в спинальные и супраспинальные структуры.

Ноцицепторы представляют собой свободные (неинкапсулированные) периферические окончания афферентных волокон. Клеточные тела ноцицептивных афферентных волокон, иннервирующих туловище, конечности и внутренние органы, находятся в ганглиях задних корешков, в то время как тела афферентных волокон, иннервирующих голову, полость рта и шею, лежат в тригеминальных ганглиях и проецируются в тригеминальное ядро ствола головного мозга.

Наибольшее количество ноцицепторов содержится в коже, мышцах, стенках сосудов, суставах,

оболочках внутренних органов, твердой мозговой оболочке. Наиболее распространенный подкласс ноцицепторов представлен периферическими окончаниями тонких безмиелиновых С-волокон. Они представляют собой неспециализированные (полимодальные) ноцицепторы, которые могут быть активированы механическими, химическими или термическими повреждающими стимулами.

В норме ноцицептивные афферентные аксоны не имеют спонтанной электрической активности. Частота электрических разрядов в этих аксонах повышается пропорционально увеличению интенсивности внешней стимуляции.

Активация ноцицепторов сопряжена с деполяризацией Ca^{2+} -каналов. При достижении определенного порога стимуляции дистальный аксональный сегмент деполяризуется за счет вхождения в клетку ионов Na^+ , после чего генерированный потенциал действия передается в вышележащие структуры.

В процессы трансдукции вовлечены многочисленные рецепторы, расположенные на первичных афферентных волокнах. Ионотропные пуриnergические рецепторы (P_2X) активируются растяжением. Ванилоидные рецепторы (TPRV) активируются механическими и тепловыми стимулами. Один из наиболее важных рецепторов данного семейства – TPRV-1. Алкалоид стручкового перца капсаицин является блокатором TPRV-1 рецепторов, который вначале активирует,

а затем на длительное время деактивирует ноцицепторы (табл. 1).

Медиаторы воспаления и боли

В механизмах трансдукции важную роль играет целый ряд медиаторов воспаления и боли:

1. Субстанция Р – нейропептид, высвобождаемый из терминалей безмиелиновых первичных афферентных волокон. Провоспалительные эффекты субстанции Р включают: вазодилатацию, экстравазацию плазмы, дегрануляцию тучных клеток с высвобождением гистамина, хемоаттрактивное действие на лейкоциты и их пролиферацию, высвобождение цитокинов. Эффекты субстанции Р могут быть блокированы нейротоксином капсаицином, разрушающим терминали афферентных нервов.
2. Брадикинин – основная альгогенная субстанция, оказывающая прямое активирующее действие на ноцицепторы.
3. Гистамин содержится в гранулах тучных клеток, откуда высвобождается под действием субстанции Р и других медиаторов. Эффекты гистамина – вазодилатация и отек за счет повышения проницаемости посткапиллярных венул.
4. Серотонин (или 5-гидрокситриптамин, 5-НТ) накапливается в плотных гранулах тромбоцитов, он повышает проницаемость микрососудов.

Таблица 1. Некоторые рецепторы, а также их лиганды

Ионотропные рецепторы	Подтипы	Лиганды*
TRP (ванилоидные)	TRPV-1; TRPV-2	Капсаицин, ионы H^+
Пуриновые	P_2X_3	АТФ
Серотониновые	$5HT_3$	5НТ (5-гидрокси-триптамин)
NMDA (N-метил-D-аспаратовые)	NR1, NR2A-D, NR3	Глутамат
AMPA (амино-гидроксиметил-пропионовые)	iGluR1/ iGluR2, iGluR3 / iGluR4	Глутамат
Метаботропные рецепторы		
Метаботропные глутаматовые	mGluR _{1,2/3,5}	Глутамат
Простаноидные	EP_{1-4}	Простагландины E_1 и E_2
Гистаминовые	H_1	Гистамин
Серотониновые	$5HT_{1A}$, $5HT_{2A}$, $5HT_4$	5НТ
Брадикининовые	B_1 , B_2	Брадикинин
Тахикининовые	NK_1	Субстанция Р, нейрокинин А
Опиоидные	μ , δ , κ	Энкефалин, диноρφин, бета-эндорфин

* Лиганды – биохимические агенты, соединяющиеся с определенными рецепторами.

5. Простагландины играют существенную роль в начальной активации ноцицепторов, а также усиливают воспаление и отек тканей в зоне повреждения. Активация циклооксигеназы 2-го типа (ЦОГ-2) приводит к быстрому образованию простаноидов (простагландинов и тромбоксана А₂) из арахидоновой кислоты, выделяющейся из поврежденных мембран клеток.
6. Высвобождение цитокинов и интерлейкинов является компонентом периферического воспалительного ответа. Циркулирующие цитокины могут способствовать увеличению синтеза простагландинов в головном мозге. Накопление медиаторов воспаления в зоне повреждения приводит к стойкой стимуляции ноцицепторов, образованию новых ноцицепторов и формированию первичной гипералгезии.

Тканевое повреждение, обусловленное инфекцией, воспалением, ишемией, сопровождается дегрануляцией тучных клеток, гиперпродукцией клеток воспаления (моноцитов и лимфоцитов), а также индуцирует синтез ряда ферментов, в частности ЦОГ-2. Медиаторы воспаления, воздействуя через лигандзависимые ионные каналы, а также через метаболитные рецепторы, активируют (сенситизируют) ноцицепторы. К эндогенным модуляторам ноцицепции относят протеиназы, провоспалительные цитокины (ФНО, ИЛ-1, ИЛ-6), противовоспалительные цитокины (ИЛ-10) и хемокины. Активация внутриклеточного киназного каскада приводит к фосфорилированию каналов (в частности, потенциалзависимых натриевых и TRP-каналов), изменениям их кинетики и порогов и в конечном счете к сенситизации ноцицепторов. Нейропептиды (субстанция Р и кальцитонин-ген-связанный пептид), секретируемые периферическими нервными

окончаниями, способствуют привлечению плазменных факторов и клеток воспаления в зону тканевого повреждения (нейрогенный отек). Повышение чувствительности (снижение порогов) в пределах зоны поврежденных тканей, обусловленное периферическими механизмами, называется периферической сенситизацией и проявляется клинически первичной гипералгезией. НПВС способны модулировать периферические механизмы ноцицепции, угнетая синтез ПГЕ₂.

Трансмиссия

Проведение ноцицептивных стимулов из зоны повреждения в спинной мозг

Ноцицептивные стимулы проводятся с периферических ноцицепторов в задние рога спинного мозга (ЗРСМ) как по безмиелиновым, так и по миелинизированным волокнам. Ноцицептивные волокна классифицируются в соответствии со степенью их миелинизации, диаметром и скоростью проведения (табл. 2).

А-дельта аксоны ответственны за «первичную» или «быструю» боль, т.е. быстрое (в течение 1 с.) локализованное восприятие боли короткой продолжительности, а также ее характеристик (острая, жгучая и т.д.). Безмиелиновые С-волокна обеспечивают ощущение «вторичной» боли с увеличенной латентностью (от нескольких секунд до минут), существующей длительное время.

Натриевые каналы играют основную роль в проведении нейрональных потенциалов действия в ЦНС. Na⁺-каналы сенсорных нейронов являются основной точкой действия местных анестетиков, поскольку они представлены также в симпатических и моторных волокнах, действие МА распространяется и на эти волокна.

Таблица 2. Классификация афферентных волокон

Тип волокон	Степень миелинизации	Скорость проведения	Функция
Аβ-волокна, диаметр 5–20 μm	Хорошо миелинизированные	40–120 м/с	Не участвуют в ноцицепции, ответственны за тактильные ощущения и проприоцепцию
Аδ-волокна, диаметр 1–5 μm	Плохо миелинизированные	6–30 м/с	Воспринимают низко- и высокопороговые механические стимулы, тепловые воздействия
С-волокна, диаметр 0,5–1 μm	Немиелинизированные	0,2–2 м/с	Воспринимают высокопороговые механические, термические и химические стимулы (большинство ноцицептивных афферентных аксонов относится к этому классу)

Изменения кинетики Na^+ -каналов, обусловленные тканевым повреждением, способствуют формированию гипервозбудимости нейронов.

Структура заднего рога спинного мозга

Анатомически задний рог состоит из 6 пластин (см. рисунок).

Пластина I (краевая зона).

Краевая зона ЗРСМ состоит из крупных, поперечно ориентированных нейронов. Нейроны I пластины реагируют на:

- интенсивные механические стимулы (Аδ-волокна);
- термические стимулы интенсивностью $> 43^\circ \text{C}$ (Аδ-волокна);
- ноцицептивные механические, термические и химические стимулы (полимодальные С-волокна).

Пластина II (желатинозная субстанция).

Нейроны II пластины активируются механическими или термическими афферентными стимулами. Нейроны, дендриты которых находятся в наружной части, активируются ноцицептивными стимулами, а те нейроны, дендриты которых расположены во внутренней части, активируются не ноцицептивными механическими стимулами.

Пластины III–V.

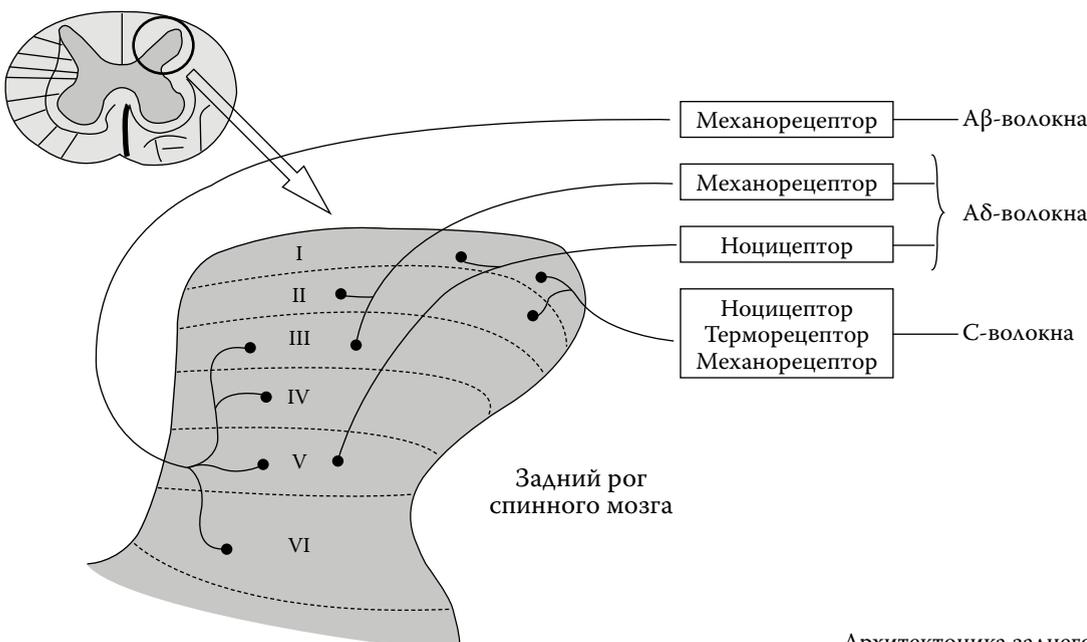
Дендриты нейронов IV пластины располагаются поперечно и дорсально, проникая в желатинозную субстанцию. Нейроны IV пластины реагируют на прикосновение (Аβ-волокна). Нейроны широкого динамического диапазона (ШДД) V пластины являются полирецептивными

и реагируют как на неболевые стимулы (прикосновение), так и на механические стимулы низкой и высокой интенсивности, а также термические и химические стимулы. Активность ШДД-нейронов возрастает в ответ на повышение интенсивности стимула. Нейроны V пластины участвуют в формировании спино-таламического, спино-ретикулярного и спино-мезенцефалического трактов.

VI пластина заднего рога содержит большое количество конвергентных нейронов, получающих входы от низкопороговых мышечных афферентных волокон, а также низко- и высокопороговых кожных и висцеральных афферентных волокон.

Центральные окончания С- и А-дельта волокон входят в спинной мозг в составе тракта Лиссауэра (на 80% состоящего из этих волокон). С-волокна заканчиваются преимущественно во II пластине (желатинозная субстанция) ЗРСМ. А-дельта волокна заканчиваются в I пластине ЗРСМ. Окончания первичных афферентных волокон в ЗРСМ передают ноцицептивные стимулы на нейроны второго порядка при помощи ряда нейротрансмиттеров, в т. ч. глутамата и субстанции Р (см. ниже). Существует два основных типа нейронов второго порядка:

- 1) ноцицептор-специфические нейроны, которые реагируют исключительно на стимулы, поступающие с А-дельта и С-волокон;
- 2) нейроны широкого динамического диапазона (ШДД-нейроны), реагирующие как на ноцицептивную, так и на неноцицептивную стимуляцию.



Архитектоника заднего рога спинного мозга

Имеются интраспинальные пути, связывающие первичные ноцицептивные афференты с моторными нейронами и вегетативными эфферентами. Активация этих проводящих путей сопровождается развитием мышечной ригидности и вегетативными реакциями (вазоконстрикция, тахикардия, выброс гормонов коры надпочечников).

Висцеральные ноцицептивные пути

Вегетативные афферентные нейроны, идущие от висцеральных органов к спинному мозгу и стволу головного мозга, являются висцеральными афферентными компонентами спинальных и черепно-мозговых нервов. Тела этих нейронов, так же как и тела соматических афферентных нейронов, располагаются в ганглиях задних корешков. Висцеральные афферентные нервы пересекают вегетативные ганглии, но не образуют с ними синапсов и входят в спинной мозг или ствол головного мозга вместе с соматическими афферентными волокнами тех же нервов. Как висцеральные, так и соматические афференты образуют рефлекторные связи с преганглионарными вегетативными нейронами ствола и спинного мозга. Таким образом, они связаны с ними функционально, но не являются их анатомическим компонентом.

Висцеральные афференты конвергируют на нейронах ЗРСМ, так же как и соматические ноцицептивные афференты.

Висцеральная боль возникает в результате появления множественных высокочастотных разрядов висцеральных афферентов, которые в норме выполняют скорее гомеостатические, чем ноцицептивные функции. В частности, висцеральные афференты могут проявлять низкочастотную активность в ответ на умеренную дилатацию полых органов, но отвечать вспышкой высокочастотных разрядов на их резкое и чрезмерное растяжение. Возникшая боль ощущается в тех дерматомах, соматические нейроны которых проецируются в тех же сегментах спинного мозга.

Особенности иннервации висцеральных органов необходимо учитывать при выборе уровня пункции и катетеризации эпидурального пространства при вмешательствах на тех или иных висцеральных структурах (табл. 3).

Например, кожа мошонки иннервируется из сакральных сегментов, в то же время при операциях на яичках необходим верхний сенсорный уровень эпидурального блока не ниже T_{10} . Это связано с тем, что висцеральные афференты от яичек вместе с симпатическими волокнами входят в спинной мозг на уровне Th_{10} .

Таблица 3. Сегментарное распределение висцеральных симпатических нервов

Голова, шея, верхние конечности	Th_{1-5}
Сердце	Th_{1-5}
Легкие	Th_{2-4}
Пищевод (нижняя часть)	Th_{5-6}
Желудок	Th_{6-10}
Тонкий кишечник	Th_{9-10}
Толстый кишечник	Th_{9-10}
Печень и желчный пузырь	Th_{7-9}
Поджелудочная железа и селезенка	Th_{6-10}
Почки и мочеточники	$Th_{10}-L_2$
Надпочечники	Th_8-L_1
Яички и яичники	$Th_{10}-L_{11}$
Мочевой пузырь	$Th_{11}-L_2$
Предстательная железа	$Th_{11}-L_2$
Матка	$Th_{10}-L_1$

При кесаревом сечении для адекватной анестезии верхний уровень блока должен достигать, по крайней мере, среднегрудных сегментов. Это связано с тем, что висцеральная и париетальная брюшина имеют достаточно большую протяженность. Тракции матки вызывают раздражение брюшины и, как следствие, боль в тех случаях, когда верхний уровень блока недостаточен для того, чтобы блокировать все ноцицептивные волокна, идущие от брюшины.

Передача ноцицептивной информации в пределах спинного мозга

В процессах трансмиссии на уровне ЗРСМ участвует ряд нейротрансмиттеров, нейромодуляторов и свойственных им рецепторов. Они могут быть разделены на две основные группы:

- 1) возбуждающие трансмиттеры, выделяемые первичными ноцицептивными афферентами или интернейронами спинного мозга;
- 2) тормозные трансмиттеры, высвобождаемые интернейронами спинного мозга или супраспинальными структурами.

Окончания первичных афферентных волокон содержат возбуждающие аминокислоты (аспартат и глутамат), пептиды (субстанция P,

кальцитонин-ген-связанный пептид) и нейротрофический фактор, которые выполняют роль нейротрансмиттеров и выделяются из терминалей под воздействием стимулов различной интенсивности. Деполяризация окончаний первичных афферентных волокон приводит к высвобождению глутамата, который активирует постсинаптические ионотропные AMPA-рецепторы.

Аспарат и особенно глутамат являются основными возбуждающими транскмиттерами. Глутамат вызывает быструю кратковременную деполяризацию нейронов второго порядка. Субстанция Р и нейрокинин ответственны за отсроченную длительную деполяризацию. Возбуждающие аминокислоты действуют на различные рецепторы, в частности AMPA и NMDA (метаботропные глутаматовые рецепторы). Активация AMPA-рецепторов вызывает входение ионов Na^+ в клетку, ее деполяризацию и последующую быструю активацию NMDA-рецепторов.

При этом осуществляется быстрая передача сигнальной информации, связанной с локализацией и интенсивностью ноцицептивной стимуляции. При этой модели «физиологической» боли стимуляция высокой интенсивности вызывает кратковременную локализованную боль, взаимосвязь стимул-ответ между афферентным входом из зоны повреждения и реакцией нейронов задних рогов спинного мозга является предсказуемой и легко воспроизводимой.

Суммация повторных стимулов с С-волокон приводит к прогрессирующему усилению деполяризации постсинаптической мембраны и удалению Mg^{2+} -блока из ионных каналов NMDA-рецепторов. Механизмы данного эффекта включают воздействие глутамата на ионотропные NMDA-рецепторы, метаботропные глутаматовые рецепторы (mGluR), а также воздействие субстанции Р на нейрокининовые (NK_1) рецепторы. При этом наблюдается быстрое, прогрессирующее с каждым стимулом увеличение частоты генерации потенциалов действия нейронами ЗРСМ, получившее название феномена «взвинчивания» активности нейронов ЗРСМ (в англоязычной литературе – «wind-up»).

Долговременная потенциация (ДВП) индуцируется высокочастотной стимуляцией, при этом усиленные ответы нейронов регистрируются и после прекращения действия вызвавшего их стимула. Этот феномен включен в механизмы «болевого памяти» на уровне гиппокампа, а также формирования сенситизации нейронов спинного мозга.

Интенсивная и длительная стимуляция повышает возбудимость нейронов ЗРСМ. При помощи электронейрофизиологических исследований выявили два основных механизма усиления постсинаптических ответов. Это «взвинчивание», обусловленное низкочастотной стимуляцией С-волокон (но не А-дельта волокон), и ДВП, индуцированная высокочастотной стимуляцией и превосходящая по длительности действие вызвавшего ее стимула.

Повышение внутриклеточной концентрации ионов Ca^{2+} , обусловленное их усиленным входом через ионные каналы NMDA-рецепторов, а также высвобождением из внутриклеточных депо, активирует ряд внутриклеточных киназных каскадов. Последующие изменения кинетики ионных каналов и/или активности рецепторов, образование дополнительных рецепторов в мембранах повышают эффективность симпатической передачи.

Изменения реактивности нейронов ЗРСМ и функциональной проводимости А-бета механически чувствительных волокон, а также интенсификация нисходящих «облегчающих» влияний способствуют развитию вторичной гипералгезии (т. е. снижению болевых порогов за пределами непосредственно травмированных тканей).

Модуляция

Помимо описанных выше возбуждающих механизмов, важную роль играет тормозная модуляция на уровне ЗРСМ.

Афферентные стимулы, поступающие в спинной мозг, модулируются тормозными механизмами. Тормозные влияния осуществляются через локальные тормозные интернейроны и нисходящие из супраспинальных структур тормозные пути. ГАМК-ергические и глицинергические интернейроны вовлечены в тоническое торможение ноцицептивного входа. Гибель этих нейронов приводит к возникновению хронической нейропатической боли. В тормозной модуляции ноцицепции участвуют эндогенные опиоиды и норадренергические тормозные пути.

Эндогенная активация тормозных механизмов ограничивает ответы нейронов на стимуляцию с С-волокон. Значимую роль при этом играют нейротрансмиттеры – энкефалины, эндорфины, норадреналин и серотонин. С активацией тормозных механизмов связаны механизмы действия ряда анальгетиков.

Нисходящие модулирующие проводящие пути

Нисходящие нейрональные проводящие пути подавляют перцепцию боли и эфферентные реакции на боль. Кора головного мозга, гипоталамус, таламус и центры ствола мозга (околоводопроводное серое вещество (ОВСВ), большое ядро шва, синее пятно) посылают нисходящие аксоны в спинной мозг, что позволяет модулировать трансмиссию ноцицептивной информации на уровне ЗРСМ.

Терминалы нисходящих аксонов тормозят высвобождение ноцицептивных нейротрансмиттеров из первичных афферентов, а также ослабляют реакцию нейронов второго порядка на ноцицептивную стимуляцию.

ОВСВ является энкефалинергическим ядром ствола, ответственным за морфин-индуцированную анальгезию. Нисходящие аксоны из ОВСВ проецируются в ретикулярную формацию, а затем опускаются в спинной мозг, где образуют аксоны с тормозными нейронами ШДД и другими нейронами. Аксональные терминалы из ядра шва проецируются в ЗРСМ, где они высвобождают серотонин и норадреналин. Аксоны, нисходящие из синего пятна, модулируют трансмиссию на уровне ЗРСМ за счет высвобождения норадреналина и активации постсинаптических альфа-адренергических рецепторов. ГАМК-ергические и энкефалинергические интернейроны в ЗРСМ также обеспечивают локальное торможение ноцицепции.

Нисходящие пути участвуют в модуляции передачи ноцицептивной информации на спинальном уровне, за счет пресинаптического действия на первичные афферентные волокна, постсинаптического действия на проекционные нейроны или же за счет действия на вставочные нейроны задних рогов. В этих процессах участвуют как прямые кортикофугальные (эфферентные), так и опосредованные (через модулирующие структуры типа околоводопроводного серого вещества) пути от коры головного мозга и гипоталамуса.

Относительный баланс между тормозными и облегчающими влияниями варьирует в зависимости от типа и интенсивности стимула, а также времени, прошедшего с момента травмы. Серотонинергические и норадренергические пути в задне-боковых канатиках участвуют в реализации нисходящих тормозных эффектов, серотонинергические пути задействованы и в облегчающих эффектах.

Таким образом, анальгезия может быть достигнута усилением торможения (опиоиды, антидепрессанты) и/или ограничением активирующей стимуляции (местные анестетики, кетамин).

Проведение ноцицептивных стимулов из спинного мозга в супраспинальные структуры

В проведении ноцицептивных стимулов из спинного мозга в супраспинальные структуры участвуют несколько восходящих трактов, в частности спиноталамический, спиноретиккулярный, спиномезенцефалический и спинолимбический. Основным путем передачи ноцицептивной информации является спиноталамический тракт (СТТ). СТТ состоит из двух проводящих путей: латерального неоспиноталамического (НСТТ) и расположенного медиальнее палеоспиноталамического (ПСТТ). НСТТ проецируется в неоталямус, клетки которого передают ноцицептивные импульсы непосредственно в соматосенсорные зоны коры головного мозга. При этом осуществляется быстрая перцепция (локализация) боли и реакции избегания. Латеральный тракт также обеспечивает дискриминацию боли, ее сенсорные характеристики (пульсирующая, жгучая и т. п.).

ПСТТ представляет собой медленный полисинаптический тракт, который проецируется в ретикулярную активирующую систему, околоводопроводное серое вещество и медиальный таламус. Клетки медиального таламуса отдают проекции во фронтальную и лимбическую зоны коры. PSTT участвует в перцепции длительной острой боли, хронической боли. Кроме того, он обеспечивает восприятие плохо локализованных неприятных ощущений спустя длительное время после первичного повреждения.

Перцепция

Центральное звено ноцицептивной системы

Вся совокупность болевых ощущений, поведенческих реакций и эмоциональной окраски боли формируется при передаче ноцицептивной информации из структур спинного мозга в средний мозг, передний мозг и кору головного мозга по проводящим путям. Спиноталамический путь восходит из первичных афферентных терминалей I и II пластин ЗРСМ в таламус, откуда ноцицептивная информация по таламокортикальным связям передается в соматосенсорные области коры. Спиноталамический путь обеспечивает дискриминационное восприятие болевых ощущений (определение источника боли и типа болевой стимуляции).

Спиноретиккулярный и спиномезенцефалический тракты дают проекции в продолговатый мозг и ствол головного мозга, участвуя, таким образом, в формировании гомеостатических

и вегетативных реакций в ответ на ноцицептивную стимуляцию. Они же дают проекции в кору головного мозга, принимая участие в формировании эмоционально-аффективного компонента боли.

Спинарарабрахиальный путь формируется из поверхностных нейронов I пластины задних рогов спинного мозга и проецируется в вентромедиальный гипоталамус и центральное ядро миндалевидного тела.

Первичная и вторичная гипералгезия

Согласно определению Международной ассоциации по изучению боли, под гипералгезией понимают «избыточную реакцию на умеренную ноцицептивную стимуляцию». Первичная гипералгезия или периферическая сенситизация является отражением активации и сенситизации ноцицептивных А-дельта волокон и терминальных окончаний полимодальных С-волокон в травмированных тканях. Основой вторичной гипералгезии или центральной сенситизации является спинальная нейропластичность и облегчение передачи ноцицептивной информации в супраспинальные структуры.

Первичная гипералгезия

Первичная гипералгезия развивается вследствие первичной активации ноцицепторов (трансдукции) в ответ на механическую, термическую или химическую стимуляцию. Периферические медиаторы механического и термического повреждения включают ионы K^+ и H^+ , простагландины (PGE_2), цитокины (ИЛ-6, ИЛ-10, ФНО α) и так называемые аутокоиды (субстанцию Р, ангиотензин II, брадикинин, гистамин, серотонин).

Под действием медиаторов боли и воспаления ноцицепторы становятся сенситизированными, они деполяризуются спонтанно или под влиянием низкопороговой стимуляции. Ноцицепторные терминалы содержат ряд мембранных рецепторов и ионных каналов, в т. ч. ванилоидные (TPRV-1) рецепторы, пуриnergические рецепторы. TPRV-1-рецепторы инициируют образование потенциалов в периферических терминалах, они же ответственны за трансформацию ноцицептивных стимулов в поток потенциалов действия.

Повышение активности ЦОГ-2 способствует конвертации арахидоновой кислоты, высвобождающейся из мембран поврежденных клеток, в PGE_2 ,

первичный медиатор ноцицепции и инициатор трансдукции. Брадикинин и каллидин связываются с конституциональными G-протеиновыми рецепторами (именуемыми V_2 -рецепторами), которые, в свою очередь, активируют фосфолипазы А и С, а также протеинкиназу С. Брадикинин также активирует потенциалзависимые ионные каналы, изменяя ионные потоки K^+ и Na^+ , что приводит к повышению чувствительности термомеханических С-ноцицепторов.

Взаимодействие брадикинина с TPRV-1-рецепторами играет значительную роль в механизмах брадикинин-индуцированной гипералгезии. Сенситизированные брадикинином TPRV-1-рецепторы приобретают способность активироваться при более низкой температуре.

В механизмах ранних фаз первичной гипералгезии основное значение имеют медиаторы воспаления, на более поздних стадиях свою роль играют патофизиологические изменения, включающие повреждения нейронов, эффекты эфферентной симпатической потенциации, влияние нейтрофильной и лимфоцитарной инфильтрации. Поздняя фаза ассоциируется с появлением эктопических разрядов и прочими проявлениями нейрональной активности, не зависящей от внешней стимуляции.

Вторичная гипералгезия

Вторичная гипералгезия – форма центральной сенситизации, являющейся следствием повреждения тканей и тканевого воспаления. Ее клинические проявления – значительное усиление ответов на ноцицептивную и неноцицептивную стимуляцию неповрежденной ткани вокруг зоны повреждения. Вторичная гипералгезия играет важную роль в повышении интенсивности боли, обусловленной физической нагрузкой и ограничивающей мобильность пациентов. Кроме того, она служит основой трансформации острой боли в хроническую.

Вторичная гипералгезия является отражением активации и прогрессирующей сенситизации ноцицептивных специфических нейронов второго порядка, а также нейронов ШДД задних рогов спинного мозга. Кроме того, в ее формировании играет роль активация нейронов ствола головного мозга и таламуса. Указанные клетки активируются потоками ноцицептивных афферентных стимулов из поврежденных тканей.

Описаны две формы вторичной гипералгезии: а) гипералгезия на легкую ноцицептивную

стимуляцию (пункционной иглой); б) гиперальгезия на легкую неноцицептивную стимуляцию (аллодиния).

Механизмы, являющиеся основой сенситизации нейронов ЗРСМ, включают усиленную афферентную стимуляцию, феномен «взвинчивания» и долговременную потенциацию.

Сочетанное воздействие ВАК и нейрокина (НК) на облегчающие ноцицептивные проводящие пути является фармакологическим краеугольным камнем феномена вторичной гиперальгезии. Глутамат и аспартат ответственны за быструю синаптическую передачу и быструю деполяризацию нейронов. Глутамат высвобождается всеми первичными афферентами, в то время как субстанция Р обнаружена только в ноцицепторах. ВАК активируют АМРА-рецепторы, которые регулируют входение в клетку ионов K^+ и Na^+ , а также интранейрональный потенциал. Усиленный вход Na^+ в клетку облегчает «запуск» и активацию NMDA-рецепторов. Спинальные и супраспинальные NMDA-рецепторы повышают входение ионов Ca^{2+} внутрь нейронов, что является основой долговременной потенциации. Сенситизация нейронов ЦНС лежит в основе трансформации острой боли в хроническую.

Клиническое значение первичной и вторичной гиперальгезии

Контроль трансдукции ноцицепторов и формирования первичной гиперальгезии является ключевым моментом снижения интенсивности и продолжительности острой боли. Сенситизация ноцицепторов приводит к снижению болевых порогов, повышению интенсивности болевых ощущений и удлинению сроков реабилитации. Физиологический ответ на трансдукцию

(инициацию ноцицепции) может быть ограничен периоперационным назначением неопиоидных анальгетиков (прежде всего, НПВС). Опиоидные анальгетики способны, в определенной степени, препятствовать высвобождению субстанции Р из терминалей первичных афферентов. Однако их анальгетический эффект будет ограниченным в условиях сенситизации ноцицепторов простагландинами, брадикинином и другими медиаторами воспаления.

Центральная сенситизация играет важнейшую роль в механизмах хронизации боли. Формирование хронического болевого синдрома подразумевает развитие пластических изменений в структурах ЦНС, скорость которых увеличивается при условии неадекватной фармакотерапии в раннем послеоперационном периоде. Длительная «бомбардировка» нейронов задних рогов спинного мозга ноцицептивными стимулами из поврежденных тканей приводит к прогрессирующему увеличению количества их связей с нейронами ШДД, а также возрастанию числа NMDA-рецепторов на постсинаптических мембранах. Аксоны ШДД-нейронов проникают в зоны, где находятся клеточные тела ноцицептивных нейронов. Таким образом, расширяются рецептивные поля, которые приобретают способность воспринимать и неноцицептивные стимулы. В результате всех указанных изменений неноцицептивная афферентная стимуляция (механическая и проприоцептивная) воспринимается как ноцицептивная, что создает условия поддержания сенситизации даже после заживления первичного повреждения тканей.

Знание основ патофизиологии острой боли является залогом успеха комплексного лечения и профилактики острого послеоперационного болевого синдрома.

Литература

1. Кукушкин М. А., Хитров Н. К. Общая патология боли. М.: Медицина, 2004. 141 с.
2. Ballantyne J, Fishman S, Addi S. The Massachusetts General Hospital Handbook of Pain Management. 2nd edition. Philadelphia: Lippincott Williams&Wilkins, 2002.
3. Vonica's Management of Pain. 3rd edition, Philadelphia: Lippincott Williams&Wilkins, 2001.
4. Macintyre P, Schug S. Acute Pain Management. A practical guide. 3rd edition. Elsevier, 2007.
5. Macintyre P. et al. Acute Pain Management: Scientific Evidence. 3rd edition. Australian and New Zeland College of Anaesthetists, 2010.
6. Jensen T. Pathophysiology of pain: from theory to clinical evidence // Eur. J. Pain Suppl. 2008; 2: 13–17.