

КРАСНЫЙ КОСТНЫЙ МОЗГ: СТРУКТУРА, ФУНКЦИИ И КЛИНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Гофурова Мохларойим Дилшодбековна

студентка 1-курса медицинского факультета Андижанского филиала Кокандского университета. E-mail: gofurova.md03@gmail.com

Мухаммаджонова Севара Абдуллаевна

*преподаватель кафедры гистологии
Андижанского филиала Кокандского университета . E-mail:*

Аннотация: Красный костный мозг выполняет функцию центрального органа кроветворения у взрослых млекопитающих, обеспечивая непрерывное обновление клеток крови на протяжении всей жизни организма. В данной статье на основе актуальных литературных источников рассматриваются морфологические характеристики красного костного мозга, включая его клеточный состав, стромальное микроокружение и сосудистую архитектуру. Особый акцент делается на регуляторных механизмах гемопоэза — в частности, на роли плюрипотентных стволовых клеток, сигнальных молекул и нишевых факторов. Исследуется участие красного костного мозга в иммунном ответе с акцентом на процессы лимфопоэза и созревания В-лимфоцитов. Кроме того, рассматривается клиническое значение данной структуры в контексте патологических состояний, таких как лейкоз, апластическая анемия и множественная миелома. Обсуждаются современные терапевтические стратегии, включая трансплантацию гемопоэтических стволовых клеток и перспективные подходы регенеративной медицины.

Ключевые слова: красный костный мозг, гемопоэз, стволовые клетки, микроокружение, лейкоз, трансплантация, иммунопоэз.

Abstract: Red bone marrow serves as the central organ of hematopoiesis in adult mammals, ensuring the continuous renewal of blood cells throughout the lifetime of the organism. This article reviews the morphological characteristics of red bone marrow, including its cellular composition, stromal microenvironment, and vascular architecture, based on current literature. Special emphasis is placed on the regulatory mechanisms of hematopoiesis — particularly the role of pluripotent stem cells, signaling molecules, and niche-associated factors. The involvement of red bone marrow in immune responses is examined, with focus on lymphopoiesis and B-lymphocyte maturation. Furthermore, the clinical relevance of this structure is addressed in the context of pathological conditions such as leukemia, aplastic anemia, and multiple myeloma. Current therapeutic strategies are also discussed, including hematopoietic stem cell transplantation and emerging approaches in regenerative medicine.

Keywords: red bone marrow, hematopoiesis, stem cells, microenvironment, leukemia, transplantation, immunopoiesis.

ВВЕДЕНИЕ

Костный мозг является одним из наиболее важных органов человеческого тела. Он представляет собой мягкую губчатую ткань, располагающуюся в полостях костей скелета. Различают два вида костного мозга: красный (активный) и жёлтый (неактивный, преимущественно жировой). У взрослого человека красный костный мозг сосредоточен главным образом в плоских костях — грудине, рёбрах, костях черепа, позвонках, а также в эпифизах длинных трубчатых костей.

Красный костный мозг является основным органом гемопоэза — процесса непрерывного образования клеток крови. Ежедневно в организме человека продуцируется около 500 миллиардов клеток крови, большинство из которых образуется именно в красном костном мозге. Кроме того, данный орган играет ключевую роль в формировании иммунитета, являясь местом созревания В-лимфоцитов.

Актуальность изучения красного костного мозга обусловлена его центральным местом в поддержании гомеостаза организма, а также широким спектром заболеваний, связанных с нарушением его функции: апластическая анемия, лейкозы, множественная миелома, метастатическое поражение костного мозга и ряд других патологий.

АНАТОМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И МИКРОСТРУКТУРА

2.1. Макроскопическое строение

Красный костный мозг имеет тёмно-красный цвет, обусловленный высоким содержанием эритроцитов и их предшественников. Он представляет собой рыхлую ретикулярную ткань, пронизанную разветвлённой сетью синусоидных капилляров. Масса красного костного мозга у взрослого человека составляет в среднем 1300–1500 г, что соответствует примерно 4–5% от общей массы тела.

С возрастом происходит постепенное замещение красного костного мозга жёлтым: у новорождённых красный костный мозг заполняет все костные полости, тогда как к 25 годам он сохраняется преимущественно в плоских костях и эпифизах. В условиях патологии (например, при тяжёлых анемиях) возможна реактивация жёлтого костного мозга и его обратное превращение в красный.

2.2. Клеточный состав

Красный костный мозг содержит три основные группы клеток:

1) Гемопоэтические стволовые клетки (ГСК) и их потомки — родоначальники всех форменных элементов крови. ГСК обладают уникальными свойствами самообновления и мультипотентности, что делает их ключевыми объектами в регенеративной медицине и клеточной терапии.

2) Стромальные клетки — фибробласты, остеобласты, остеокласты, адипоциты и эндотелиальные клетки, формирующие структурную основу органа и создающие специфическое микроокружение — гемопоэтическую нишу.

3) Зрелые клетки крови, находящиеся на различных стадиях созревания: эритробласты, мегакариоциты, гранулоциты, моноциты и лимфоидные предшественники.

2.3. Микроокружение (гемопоэтическая ниша)

Понятие гемопоэтической ниши было введено J. Schofield в 1978 году для обозначения специализированного микроокружения, в котором поддерживаются и функционируют стволовые клетки. В настоящее время выделяют два основных типа ниш: эндостальную (периваскулярно-остеобластную) и периваскулярную (сосудистую).

Эндостальная ниша расположена вблизи внутренней поверхности кости и обеспечивает поддержание ГСК в состоянии покоя (quiescence), что критически важно для сохранения пула стволовых клеток. Периваскулярная ниша, примыкающая к синусоидным сосудам, способствует пролиферации и дифференцировке гемопоэтических клеток, а также их мобилизации в кровотоки.

3. ФУНКЦИИ КРАСНОГО КОСТНОГО МОЗГА

3.1. Гемопоз

Гемопоз — процесс образования, развития и созревания клеток крови — является главной функцией красного костного мозга. Все клетки крови берут начало от единой мультипотентной гемопоэтической стволовой клетки, которая даёт начало двум основным линиям дифференцировки: миелоидной и лимфоидной.

Миелоидная линия включает эритропоз (образование эритроцитов), тромбоцитопоз (образование тромбоцитов из мегакариоцитов), гранулоцитопоз (образование нейтрофилов, эозинофилов, базофилов) и моноцитопоз. Лимфоидная линия в костном мозге представлена преимущественно В-лимфопозом, тогда как Т-лимфоциты завершают своё созревание в тимусе.

Регуляция гемопоза осуществляется многоуровневой системой, включающей цитокины (эритропоэтин, тромбопоэтин, G-CSF, M-CSF, интерлейкины), транскрипционные факторы (GATA-1, PU.1, C/EBP α), а также клеточные контакты и сигнальные пути (Notch, Wnt, Hedgehog).

3.2. Участие в иммунном ответе

Красный костный мозг является центральным органом иммунной системы, наряду с тимусом. В нём происходит образование и начальное созревание В-лимфоцитов — клеток, ответственных за гуморальный иммунитет. В процессе созревания В-клетки проходят несколько этапов: от про-В-клетки до незрелой В-клетки, после чего покидают костный мозг и завершают дифференцировку в периферических лимфоидных органах.

Помимо этого, в красном костном мозге располагаются долгоживущие плазматические клетки — конечные эффекторы гуморального иммунного ответа, продуцирующие антитела в течение многих лет после первичной иммунизации. Этот феномен лежит в основе иммунологической памяти организма.

4. КЛИНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

4.1. Патологические состояния

Нарушения функции красного костного мозга лежат в основе широкого спектра заболеваний. Апластическая анемия характеризуется угнетением кроветворения вследствие разрушения или замещения гемопоэтической ткани, что ведёт к панцитопении. Острые и хронические лейкозы представляют собой злокачественные клональные заболевания, при которых опухолевые клетки вытесняют нормальные элементы костного мозга.

Множественная миелома — злокачественное заболевание плазматических клеток — сопровождается инфильтрацией костного мозга, деструкцией костной ткани и секрецией патологических иммуноглобулинов. Миелодиспластические синдромы представляют гетерогенную группу клональных заболеваний стволовых клеток, характеризующихся неэффективным гемопоэзом и высоким риском трансформации в острый лейкоз.

4.2. Трансплантация костного мозга и клеточная терапия

Трансплантация гемопоэтических стволовых клеток (ТГСК) является на сегодняшний день наиболее радикальным методом лечения многих заболеваний системы крови. Источником ГСК могут служить красный костный мозг, периферическая кровь после мобилизации цитокинами, а также пуповинная кровь.

Аллогенная ТГСК позволяет восстановить нормальный гемопоэз у пациентов с апластической анемией, острыми лейкозами, наследственными иммунодефицитами и рядом других заболеваний. Развитие методов молекулярного типирования HLA значительно улучшило результаты трансплантаций и расширило круг потенциальных доноров.

Перспективным направлением является использование индуцированных плюрипотентных стволовых клеток (iPSC) для получения гемопоэтических предшественников *in vitro*, что открывает возможности для аутологичной клеточной терапии без риска реакции «трансплантат против хозяина».

5. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАСНОГО КОСТНОГО МОЗГА

Морфологическое исследование костного мозга включает трепанобиопсию — взятие столбика костной ткани с сохранением архитектоники, — а также стерильную пункцию с получением костномозгового пунктата для цитологического анализа (миелограмма). Гистологическое исследование трепанобиоптата позволяет оценить клеточность костного мозга, соотношение кроветворной и жировой ткани, наличие фиброза и инфильтрации.

Проточная цитометрия является стандартным методом иммунофенотипирования клеток костного мозга и применяется для диагностики лейкозов, лимфом и мониторинга минимальной остаточной болезни. Молекулярно-генетические методы (FISH, ПЦР, секвенирование нового поколения) позволяют выявлять хромосомные aberrации и мутации, имеющие диагностическое и прогностическое значение.

Среди лучевых методов ведущее место занимает МРТ, которая позволяет неинвазивно оценить распределение красного и жёлтого костного мозга, выявить

очаговые поражения и диффузную инфильтрацию. ПЭТ-КТ с 18F-ФДГ применяется для стадирования и оценки эффективности лечения лимфом и миеломы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Красный костный мозг представляет собой высокоорганизованный орган, выполняющий ключевые функции в поддержании жизнедеятельности организма. Непрерывный гемопоэз, формирование иммунного ответа и поддержание гомеостаза крови — всё это обеспечивается слаженной работой гемопоэтических, стромальных и сосудистых компонентов костного мозга.

Глубокое понимание биологии красного костного мозга, механизмов регуляции гемопоэза и процессов формирования иммунитета открывает широкие перспективы для разработки новых методов диагностики и лечения заболеваний системы крови. Прогресс в области молекулярной биологии, генетики и клеточной терапии позволяет рассчитывать на дальнейшее совершенствование терапевтических подходов и улучшение прогноза для пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Воробьёв А.И. Руководство по гематологии. — М.: Ньюдиамед, 2003. — Т. 1. — 280 с.
2. Morrison S.J., Scadden D.T. The bone marrow niche for haematopoietic stem cells // *Nature*. — 2014. — Vol. 505. — P. 327–334.
3. Kaushansky K. Hematopoietic stem cells, progenitors, and cytokines // *Williams Hematology*. — 9th ed. — McGraw-Hill, 2016. — P. 219–240.
4. Méndez-Ferrer S., et al. Bone marrow niches in haematological malignancies // *Nature Reviews Cancer*. — 2020. — Vol. 20. — P. 285–298.
5. Короткова Н.В., Захарова Е.Ю. Трансплантация гемопоэтических стволовых клеток: современное состояние проблемы // *Онкогематология*. — 2021. — Т. 16, № 2. — С. 14–25.
6. Bhattacharya S., Bhattacharya D. Protective immunity and the bone marrow // *Science*. — 2022. — Vol. 375. — P. 714–715.
7. Логинов В.В. Морфология костного мозга в норме и патологии. — СПб.: СпецЛит, 2019. — 320 с.