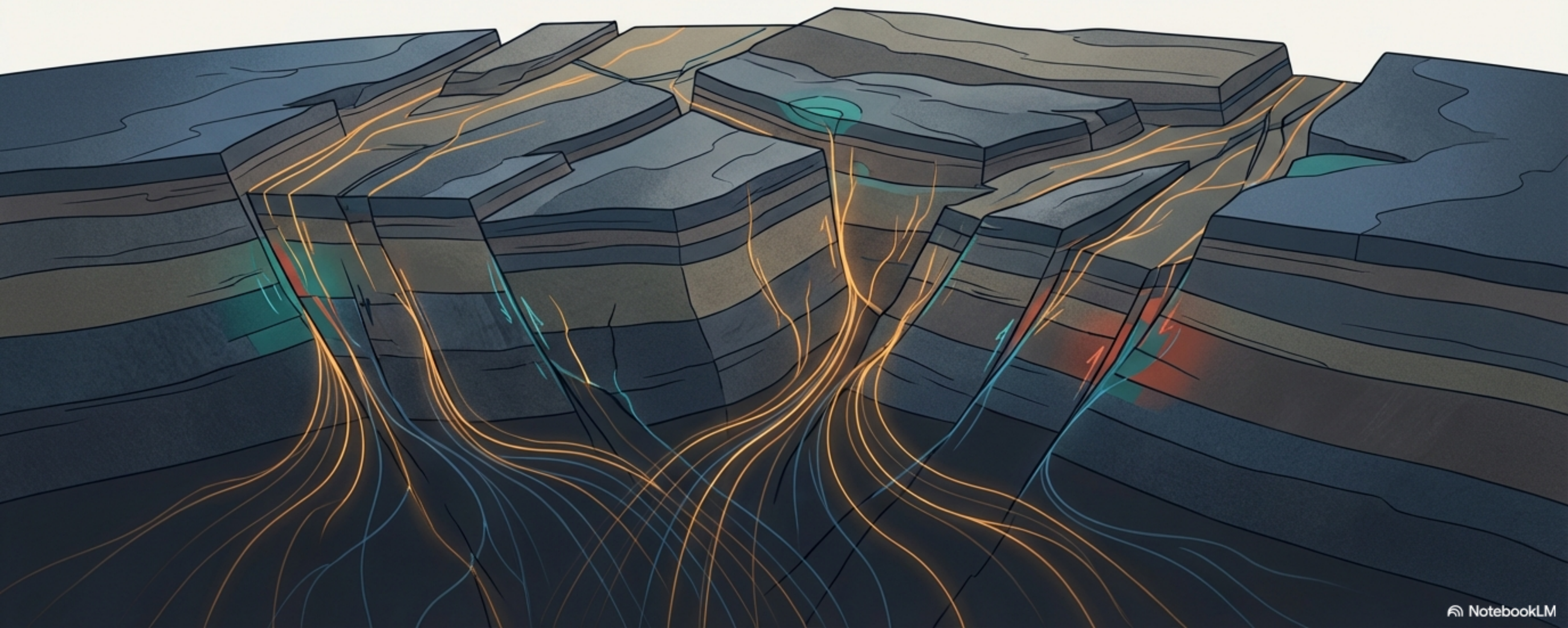


Живая Земля: Как неотектоника управляет подземными потоками

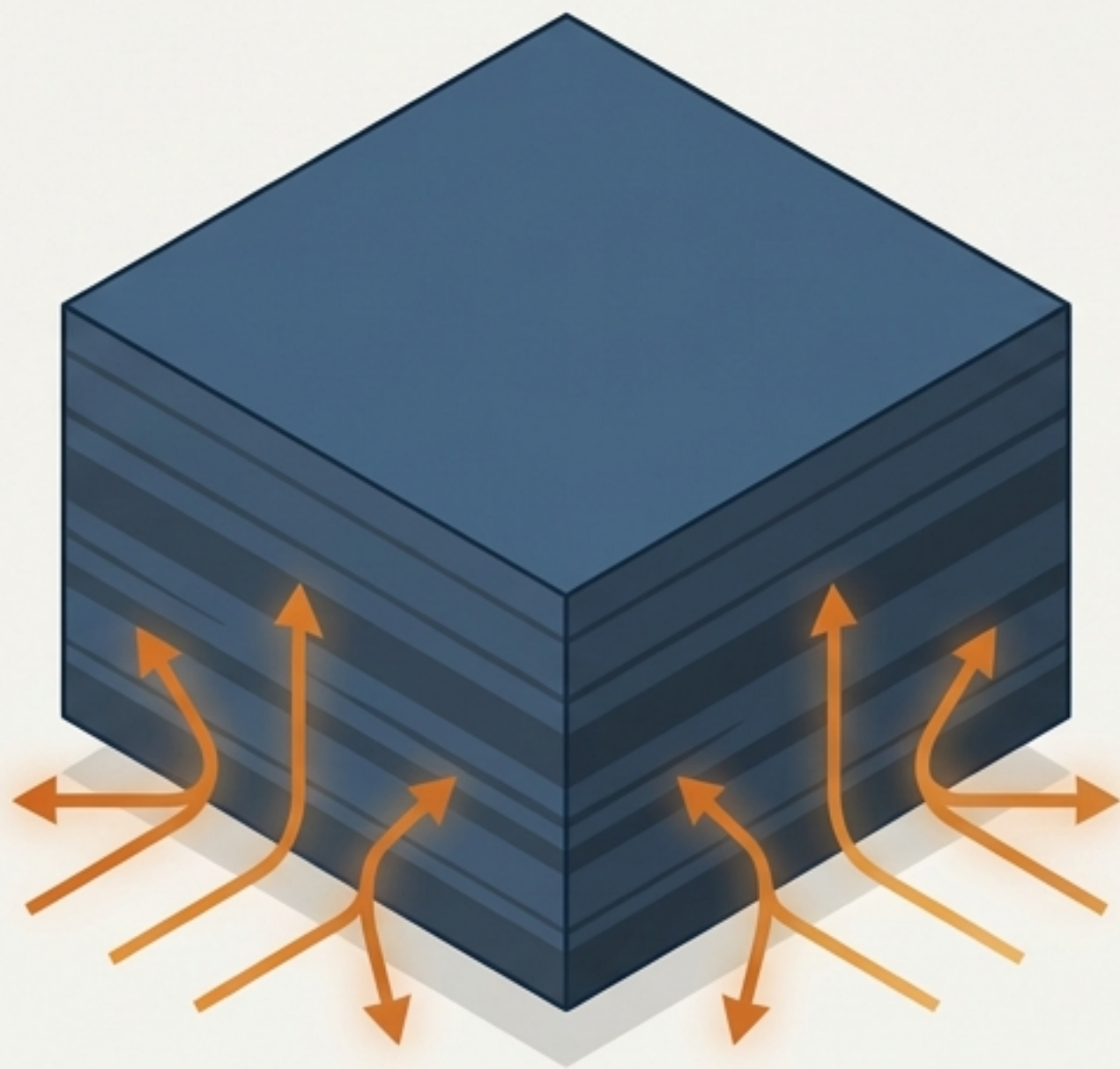
История о силах, трещинах и миграции флюидов в земной коре



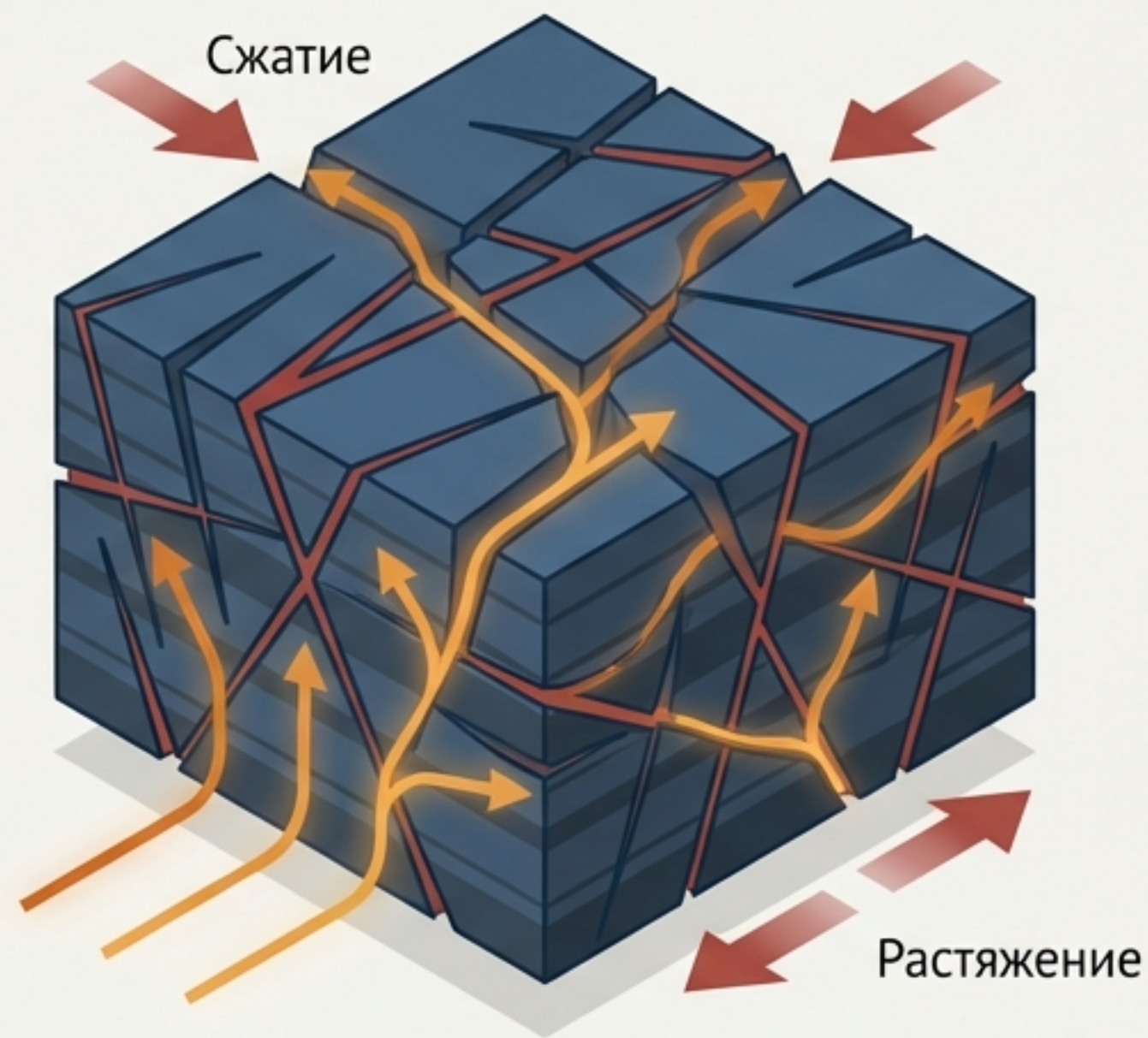
Главный архитектор подземных путей

Новейшие тектонические движения (неотектоника) – это фундаментальный процесс, который создает и постоянно изменяет «кровеносную систему» Земли. Эти движения определяют, где и как флюиды могут перемещаться через геологическую среду, которая в противном случае была бы непроницаемой.

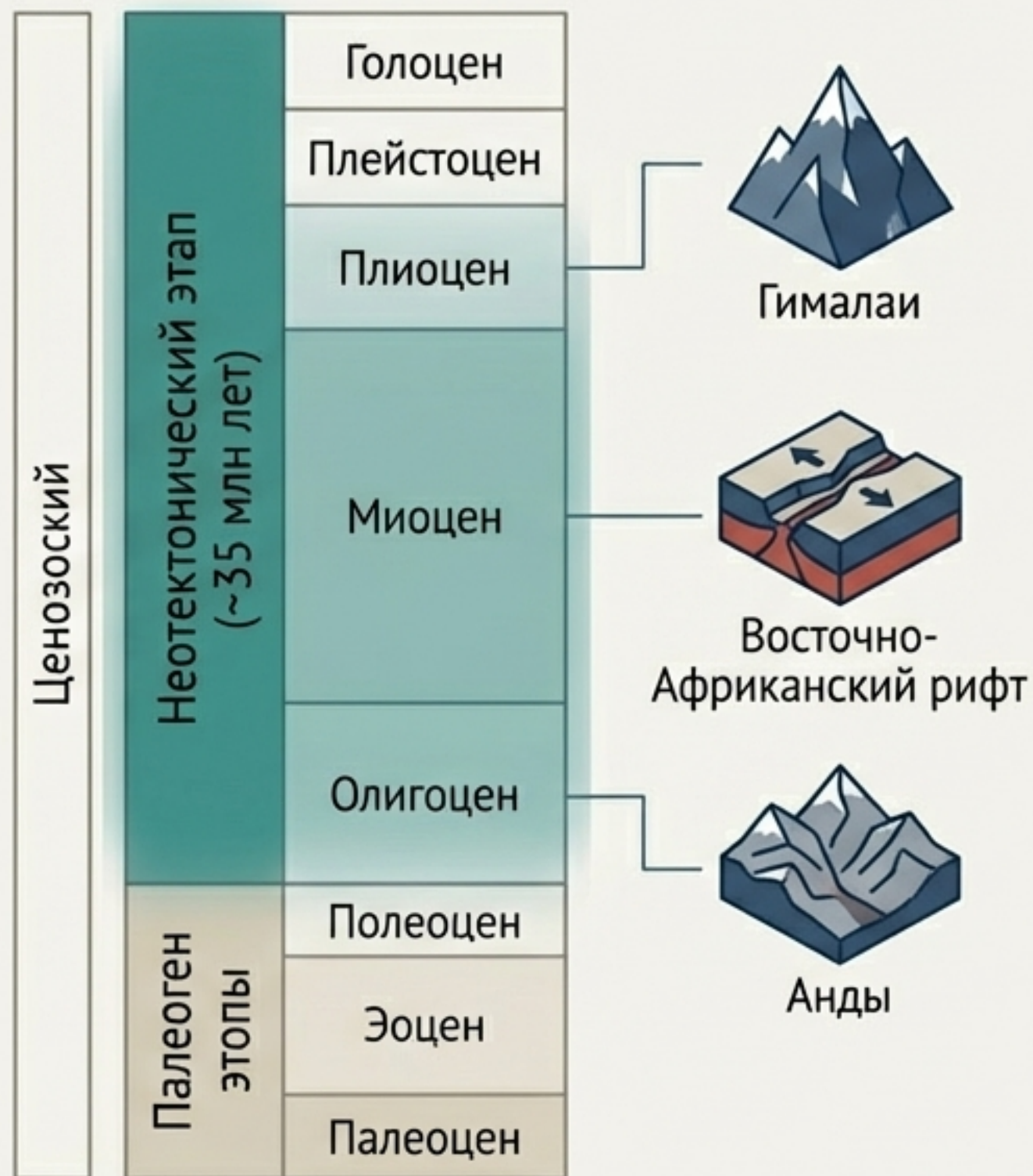
ИСХОДНЫЙ МАССИВ



ТЕКТОНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫЙ МАССИВ



Что такое неотектоника? Эпоха, сформировавшая современный рельеф.



Термин, введенный для обозначения деформаций, создавших основные черты современного рельефа.

Временной диапазон:

Охватывает период от позднего олигоцена-раннего миоцена до наших дней (**~35 млн лет**). Эта граница считается «скользящей», но знаменует начало глобальной структурной перестройки.

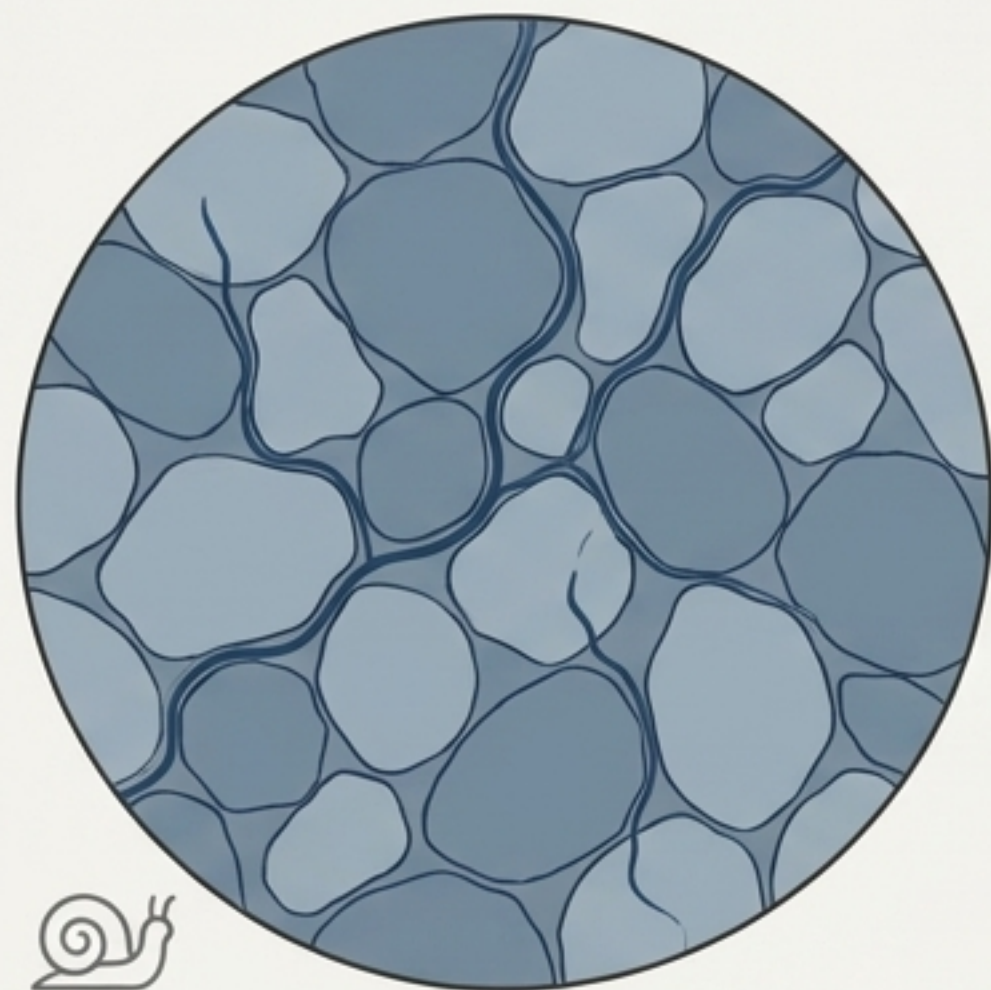
Ключевые характеристики этапа:

- Коренная структурная перестройка земной коры.
- Смена глобальных режимов тектонических напряжений.
- Повсеместная активизация деформаций и формирование современных орогенов (горных систем).

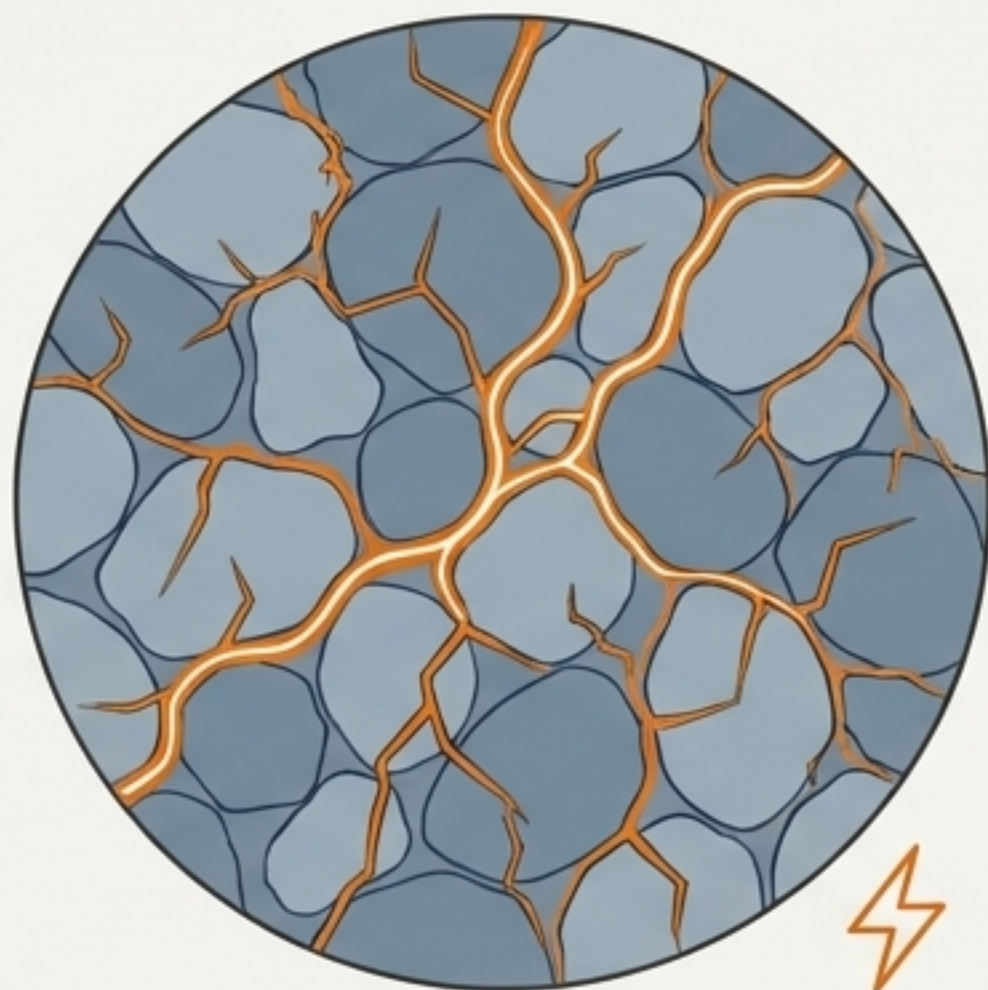
От монолита к системе каналов: Создание вторичной проницаемости

Тектонические напряжения создают сети трещин, которые радикально изменяют фильтрационные свойства горных пород, превращая их из барьеров в проводники.

Межзерновая пористость



Тектоническая трещиноватость



Увеличение проницаемости:

Тектонические трещины могут увеличивать проницаемость породы на **2–5 порядков**.

Доминирующая роль:

Трещинная проницаемость часто доминирует над межзерновой и может составлять до **20%** общей пористости породы.

x100 - x100,000



Межзерновая

Трещинная

Движение флюидов

Анатомия разлома: Сложная гидрогеологическая система

Разлом одновременно является и барьером для поперечного потока, и высокопроницаемым каналом для продольного. Его гидрогеологическая функция определяется архитектурой и соотношением его ключевых элементов.

Ядро разлома (Fault Core)

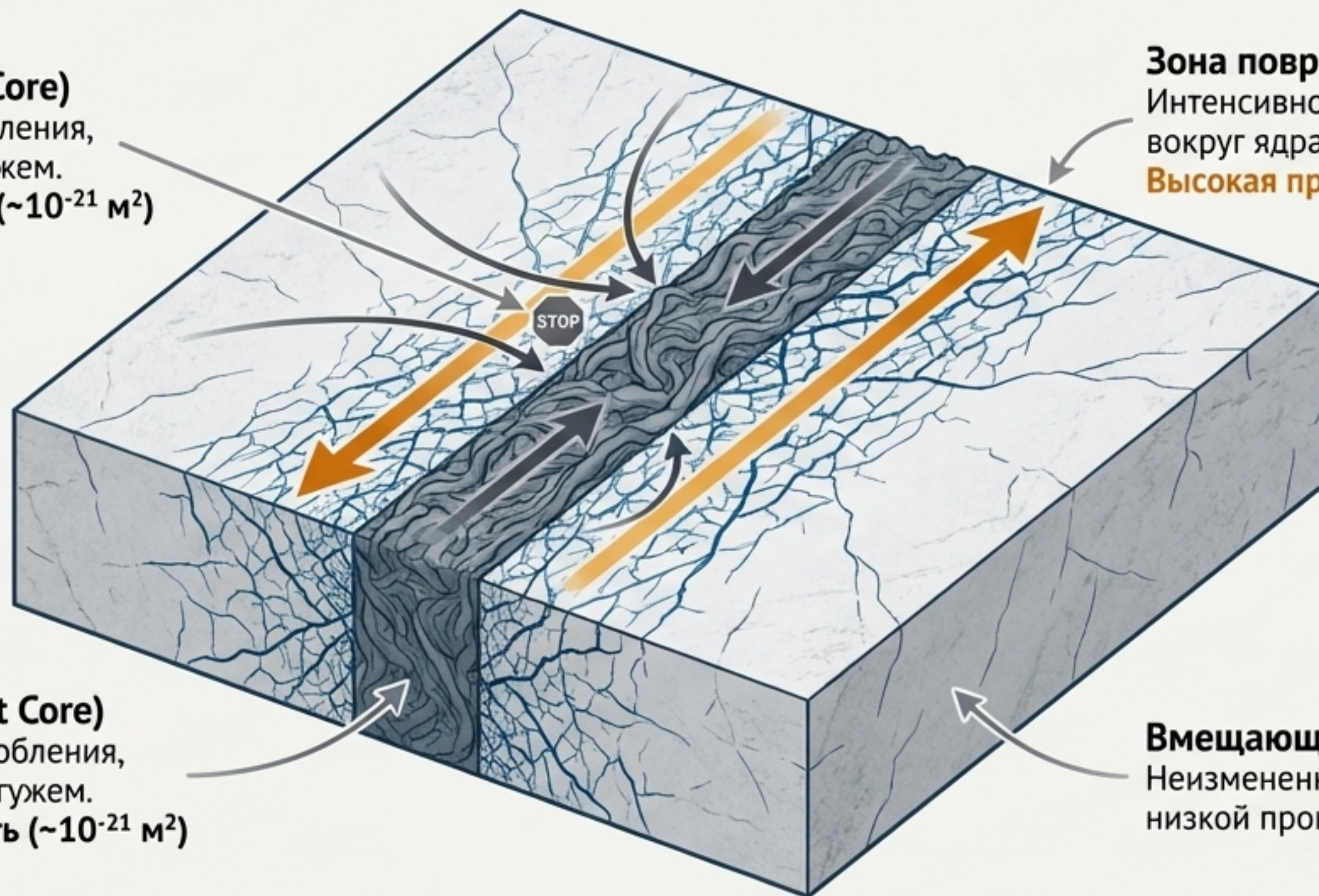
Зона интенсивного дробления, заполнена глинистым гудом.

Низкая проницаемость ($\sim 10^{-21} \text{ м}^2$)

Зона повреждений (Damage Zone)

Интенсивно трещиноватая область вокруг ядра.

Высокая проницаемость ($10^{-14} - 10^{-16} \text{ м}^2$)



Ядро разлома (Fault Core)

Зона интенсивного дробления, заполнена глинистым гудом.

Низкая проницаемость ($\sim 10^{-21} \text{ м}^2$)

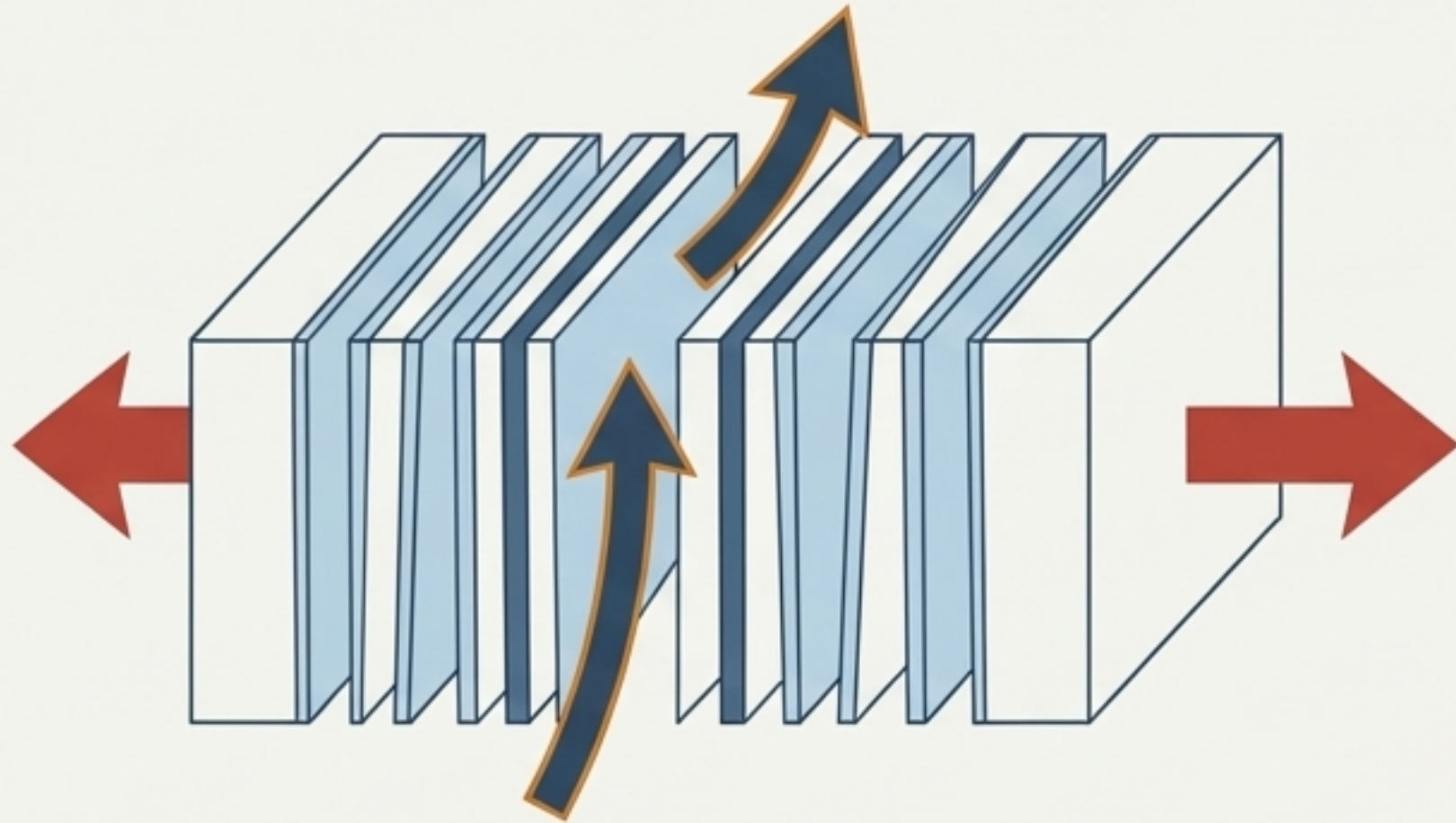
Вмещающая порода (Protolith)

Неизмененные породы с исходной низкой проницаемостью.

Тектонический «регулятор»: Как поле напряжений управляет потоком

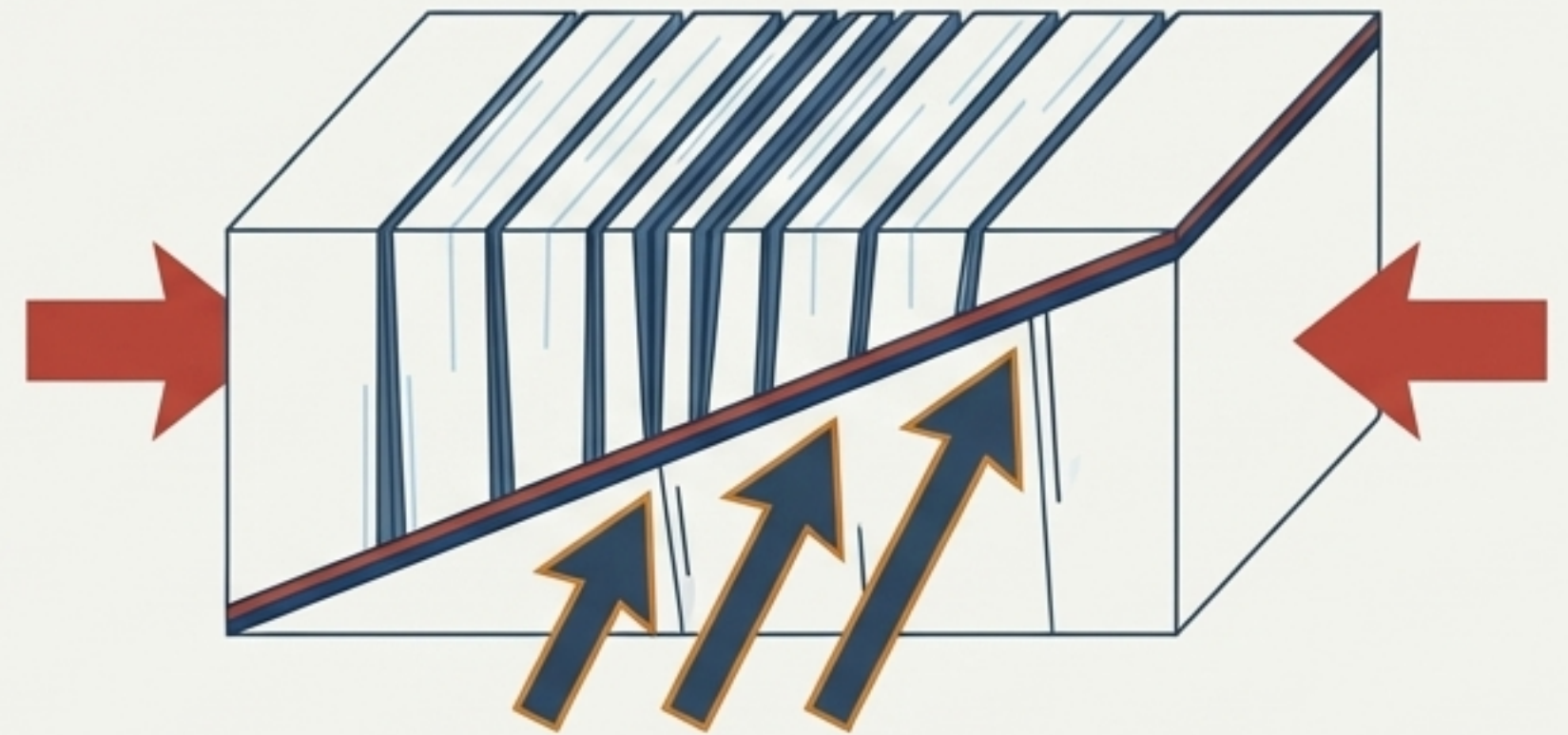
Современное поле тектонических напряжений определяет, какие из унаследованных систем трещин будут «работать» как каналы для флюидов. Проницаемость критически зависит от ориентации трещин относительно главных осей напряжений.

Режим растяжения (Extensional Regime)



Вертикальная проницаемость повышена

Режим сжатия (Compressional Regime)



Пологие разломы служат барьерами, вертикальная проницаемость снижена

Сейсмический пульс: Проницаемость не статична, она «дышит»

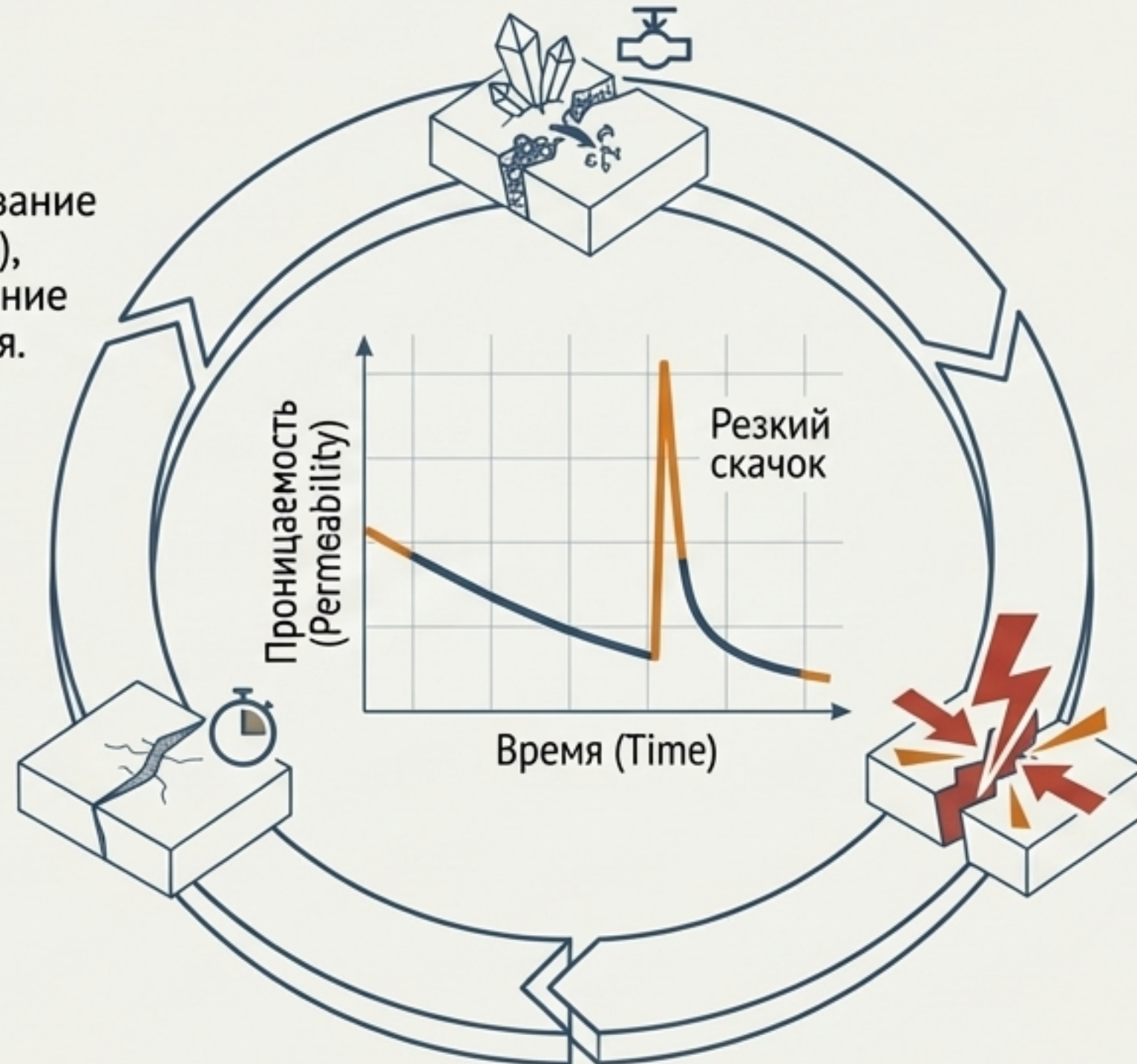
Проницаемость разломных зон испытывает драматические циклические изменения в течение сейсмического цикла, что приводит к эпизодическому, пульсирующему характеру миграции флюидов.

Межсейсмический период (Interseismic Period)

Накопление напряжений. Залечивание трещин (минеральное осаждение), падение проницаемости, накопление избыточного флюидного давления.

Постсейсмический период (Postseismic Period)

Восстановление. Постепенное снижение проницаемости и восстановление низкопроницаемого состояния.



Косейсмический период (Coseismic / Earthquake)

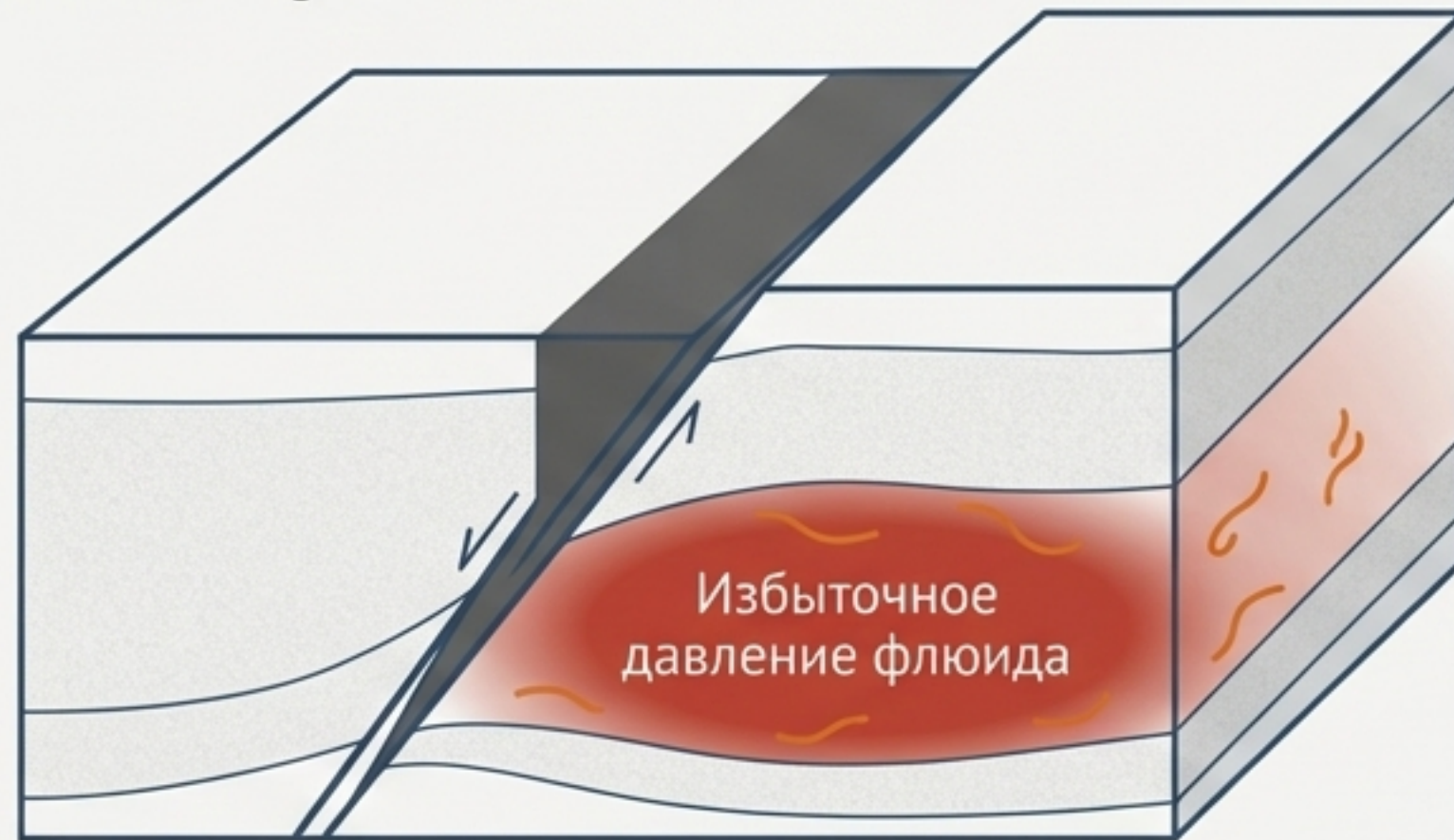
Сброс напряжений. Разрушение барьеров, резкий скачок проницаемости (до 3-х раз и более), сброс давления флюида.

Механизмы в действии: «Сейсмический насос» и «Клапанный механизм»

Эти концепции объясняют, как циклические изменения проницаемости во время землетрясений приводят к принудительной, быстрой миграции флюидов из зон высокого давления в недрах к поверхности.

Этап 1: Клапан закрыт (Межсейсмический)

PT Sans Regular



Этап 2: Клапан открыт (Землетрясение)

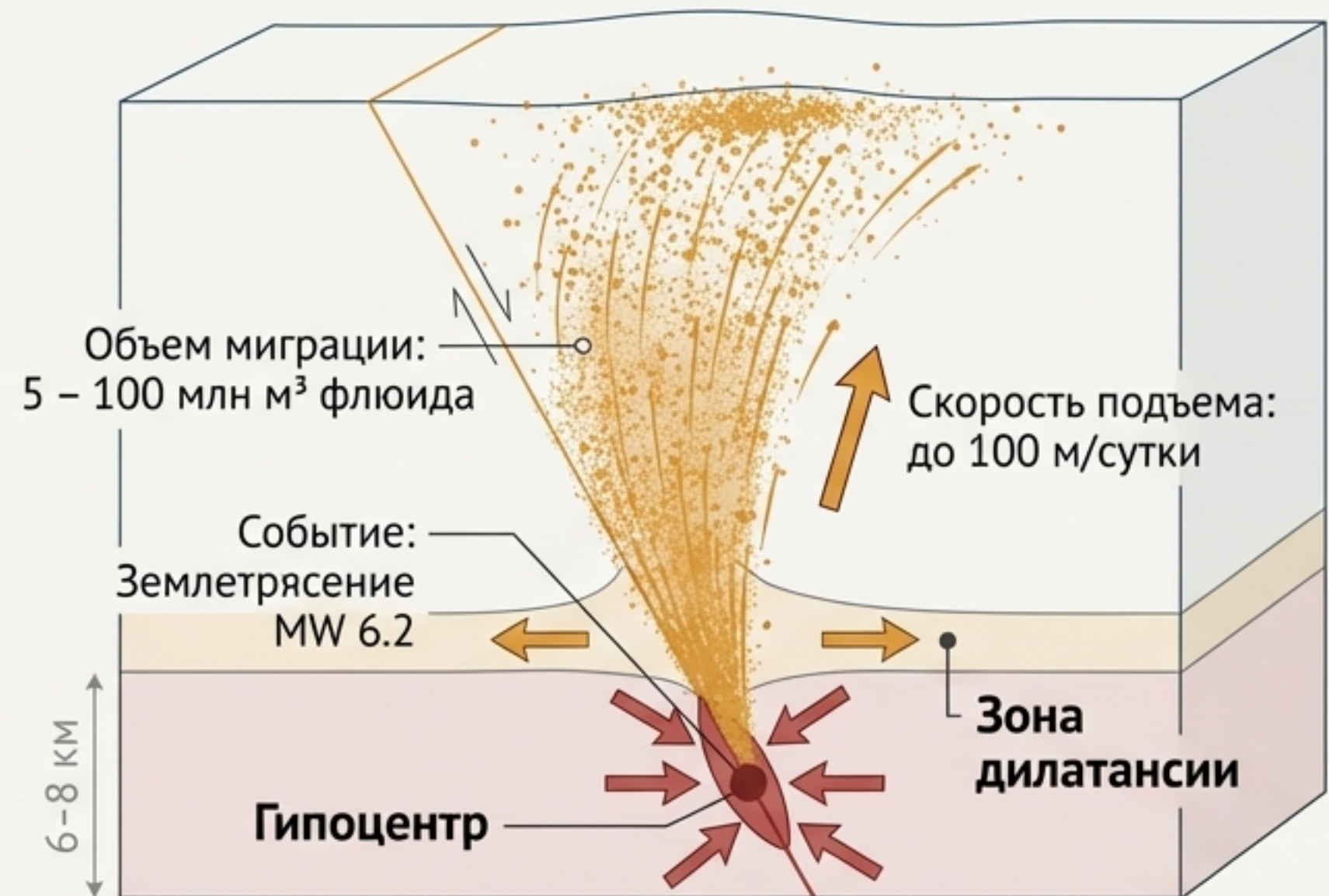
PT Sans Regular



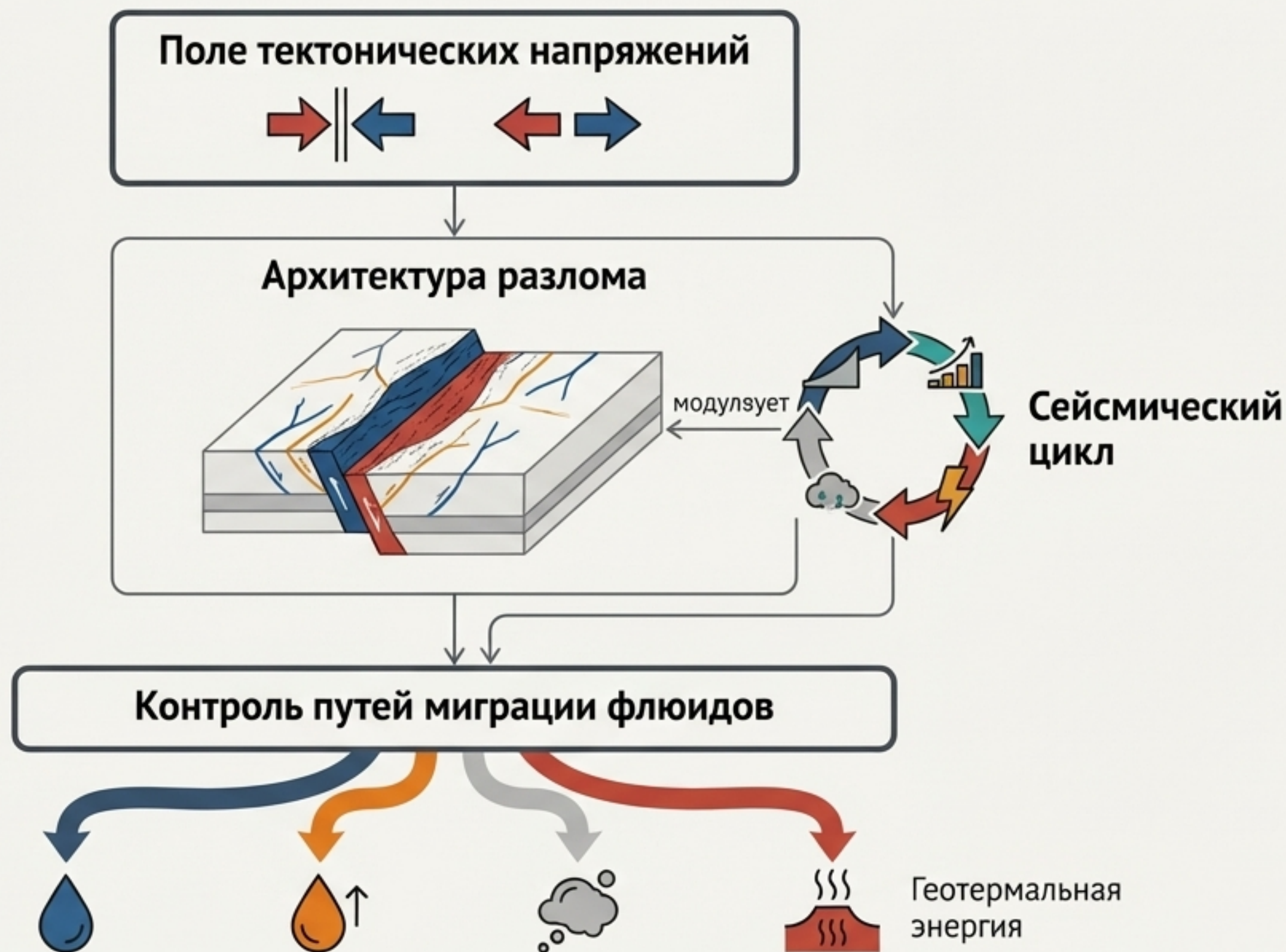
Концепции предложены и развиты Р. Сибсоном.

Кейс: Землетрясение в Л'Аквиле, Италия (2009)

Прямое доказательство работы сейсмического насоса. Постсейсмический анализ выявил масштабную миграцию флюидов от гипоцентральных глубин к поверхности.

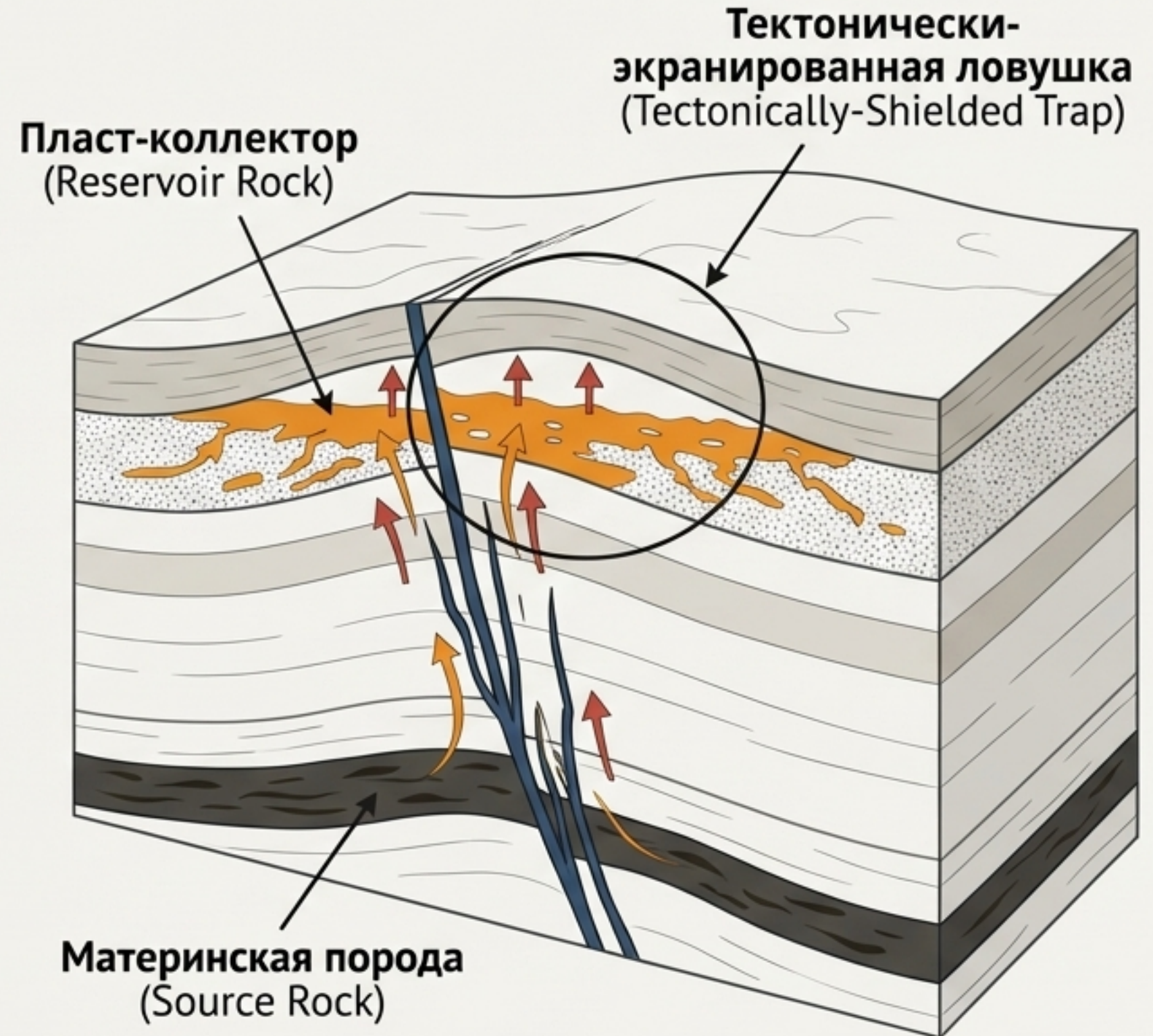


Единая система: От поля напряжений до миграции флюидов



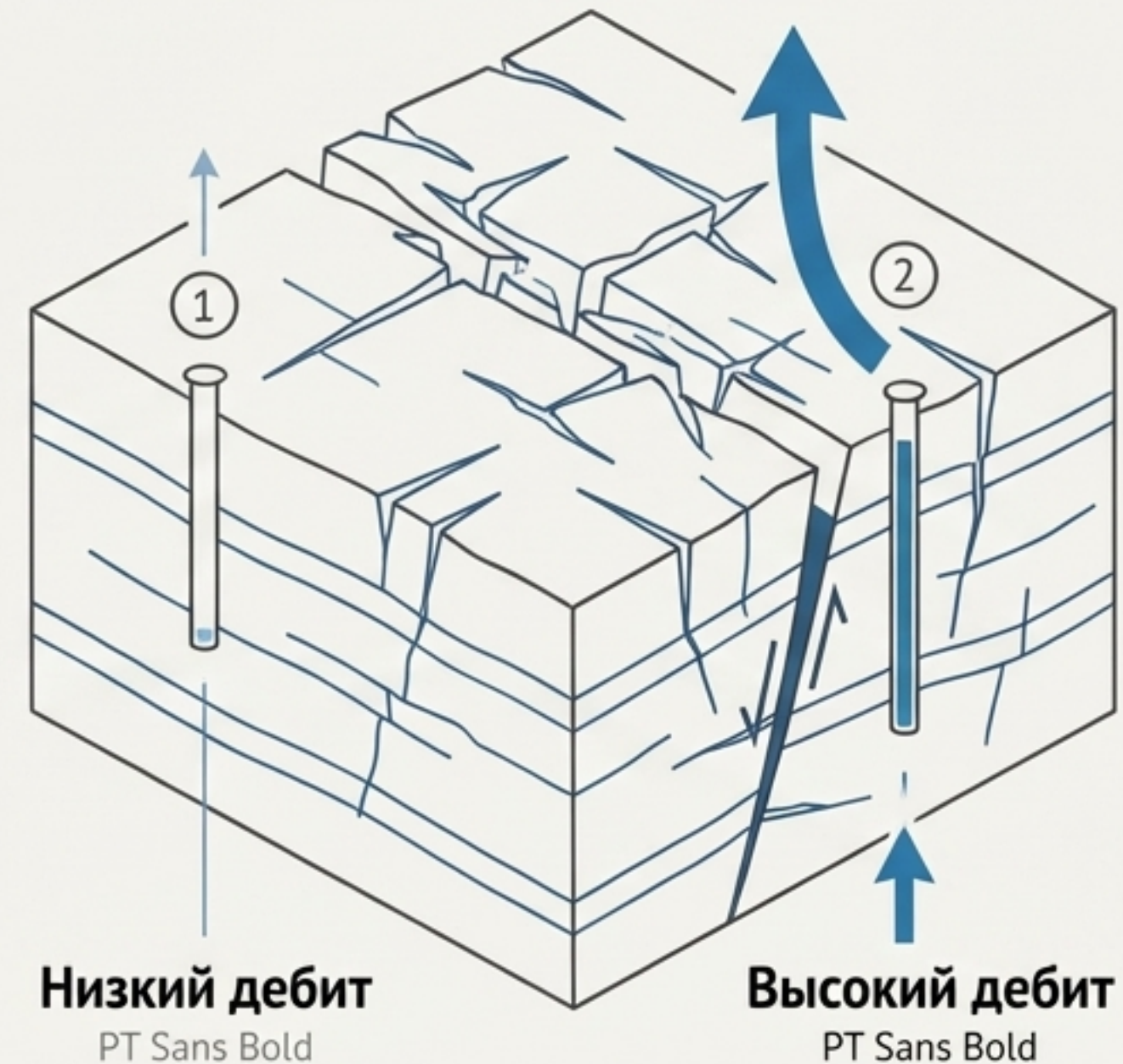
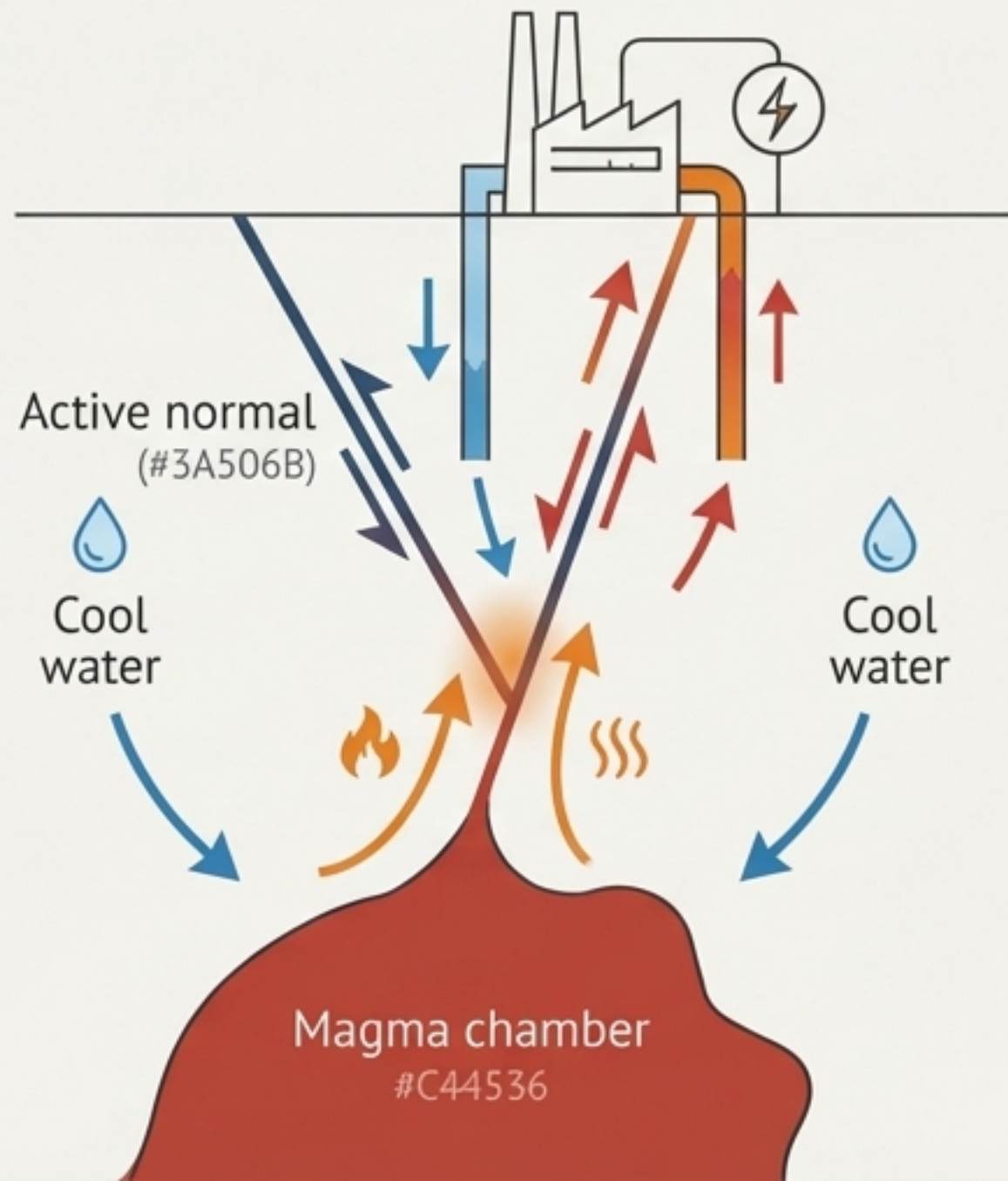
Применение 1: Нефтегазовая геология

- **Прямая зависимость:** Масштаб нефтеносности часто прямо пропорционален интенсивности неотектонических движений.
- **Пути миграции:** Активные разломы служат основными магистралями для вертикальной миграции углеводородов из материнских пород в коллекторы.
- **Формирование ловушек:** Разрывные нарушения создают тектонически экранированные ловушки, необходимые для аккумуляции залежей.
- **Коллекторы:** Тектоническая трещиноватость является критическим фактором для улучшения свойств низкопроницаемых коллекторов.



Применение 2: Геотермальная энергия и водоснабжение

- **Геотермальные ресурсы:** Неотектонические разломы в режиме растяжения создают идеальные пути для восходящего движения глубинных термальных вод, формируя **высокотемпературные геотермальные системы**.
- **Водоснабжение:** Водоносный потенциал трещинных коллекторов контролируется кинематикой разломов. Скважины, пробуренные вдоль «открытых» трещин растяжения, имеют значительно более высокий дебит.



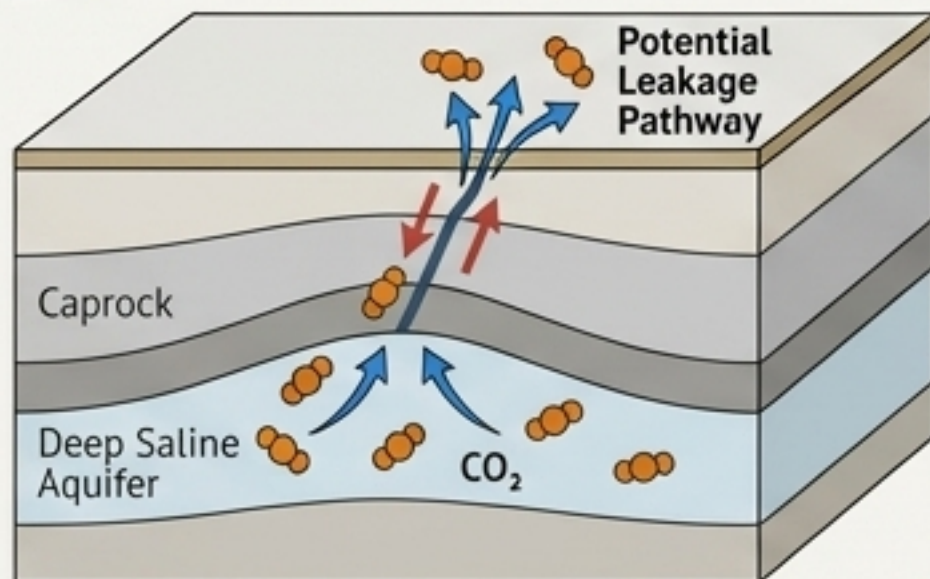
Применение 3: Геоэкология и безопасность

Понимание проницаемости разломов критически важно для оценки и управления геологическими рисками.



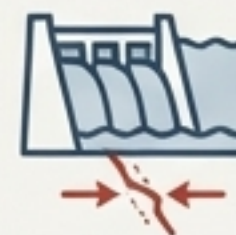
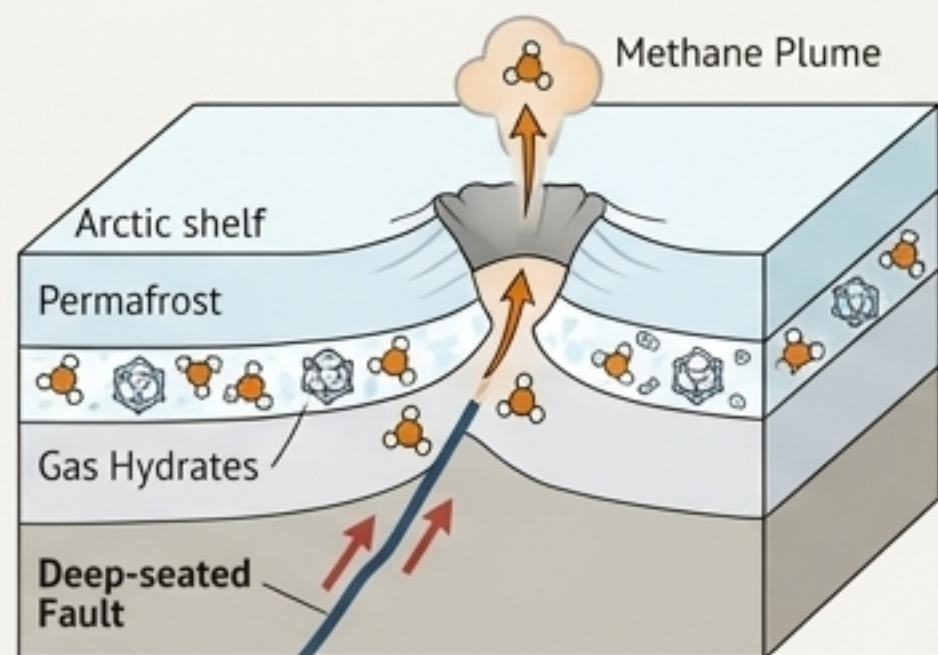
Хранение CO₂ и отходов

Активные разломы представляют собой потенциальные пути утечки при геологическом захоронении CO₂ и радиоактивных отходов, требуя тщательной оценки их изолирующих свойств.



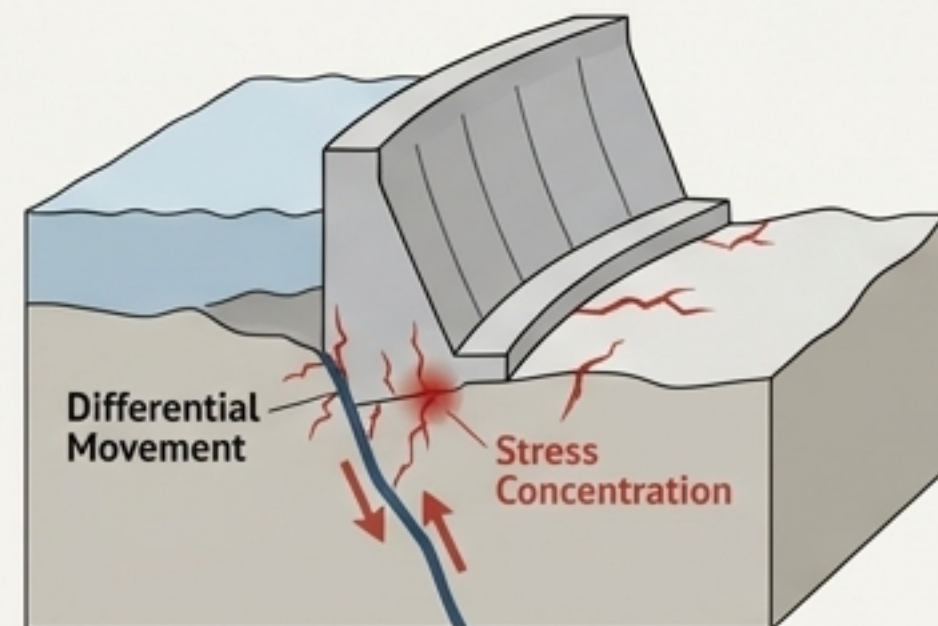
Геохазарды

Глубинная дегазация и эмиссия метана в Арктике, приводящая к образованию кратеров, контролируется сетями активных разломов.



Инженерная безопасность

Устойчивость крупных инженерных сооружений напрямую зависит от современной геодинамической активности в зонах разломов.



Ключевые выводы



Драйвер: Неотектоника – главный регулятор проницаемости земной коры, создающий ее «кровеносную систему».



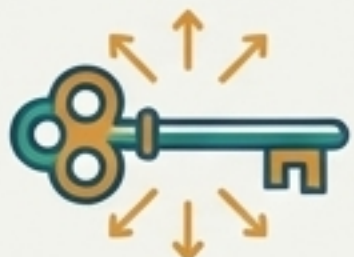
Архитектура: Разломы – это сложные структуры, одновременно являющиеся и барьерами (ядро), и проводниками (зона повреждений).



Динамика: Проницаемость не статична; она циклически изменяется в ритме землетрясений («сейсмический пульс»).



Контроль: Современное поле напряжений действует как «переключатель», активируя или закрывая унаследованные системы трещин.



Значение: Это знание – ключ к разведке ресурсов, развитию геотермальной энергетики и оценке геологических рисков.



“Понимание этих процессов позволяет нам не просто изучать прошлое Земли, но и читать ее настоящее и прогнозировать будущее.”