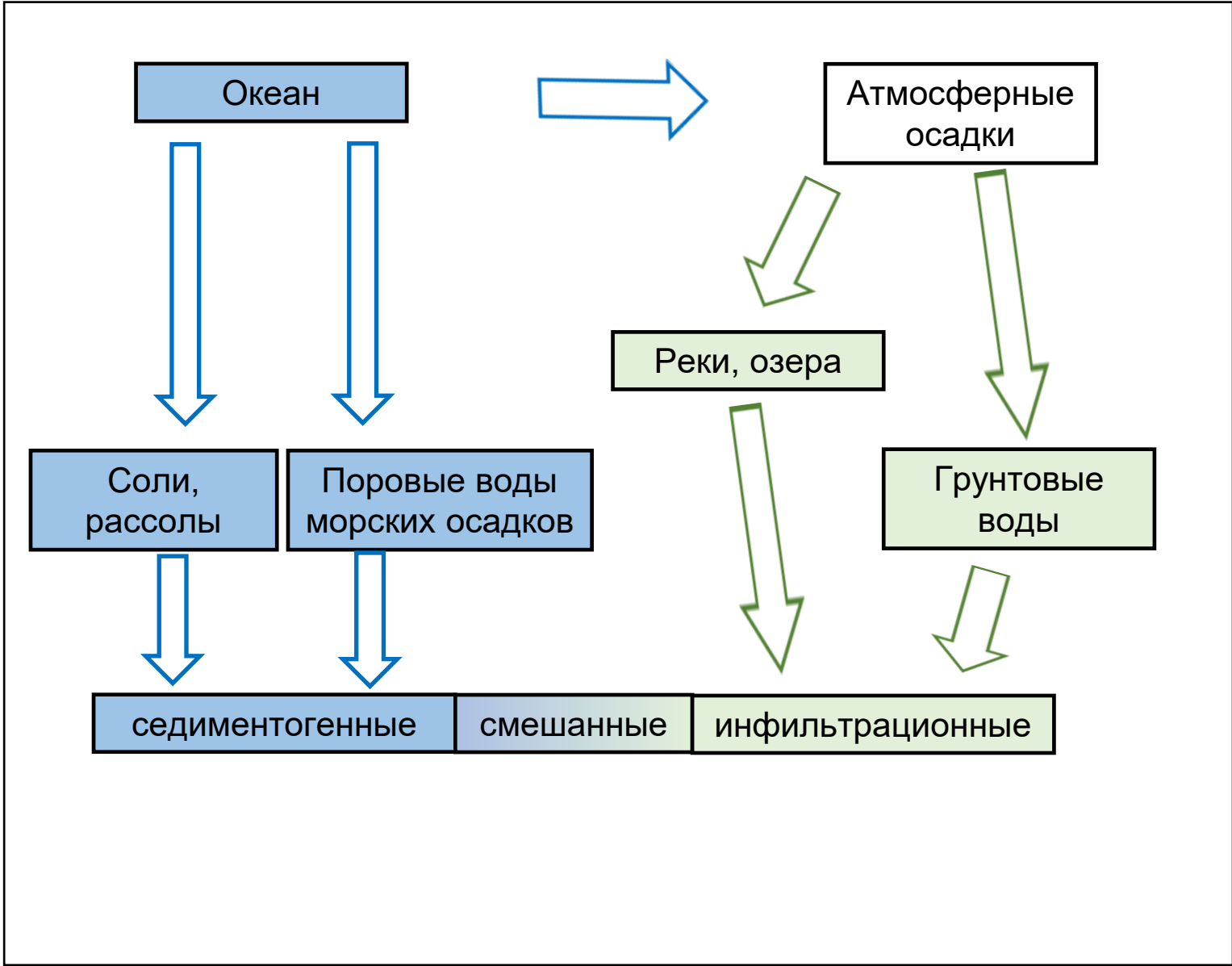


Тема 15. Подземные воды

Вклад подземных вод в ресурсы гидросферы

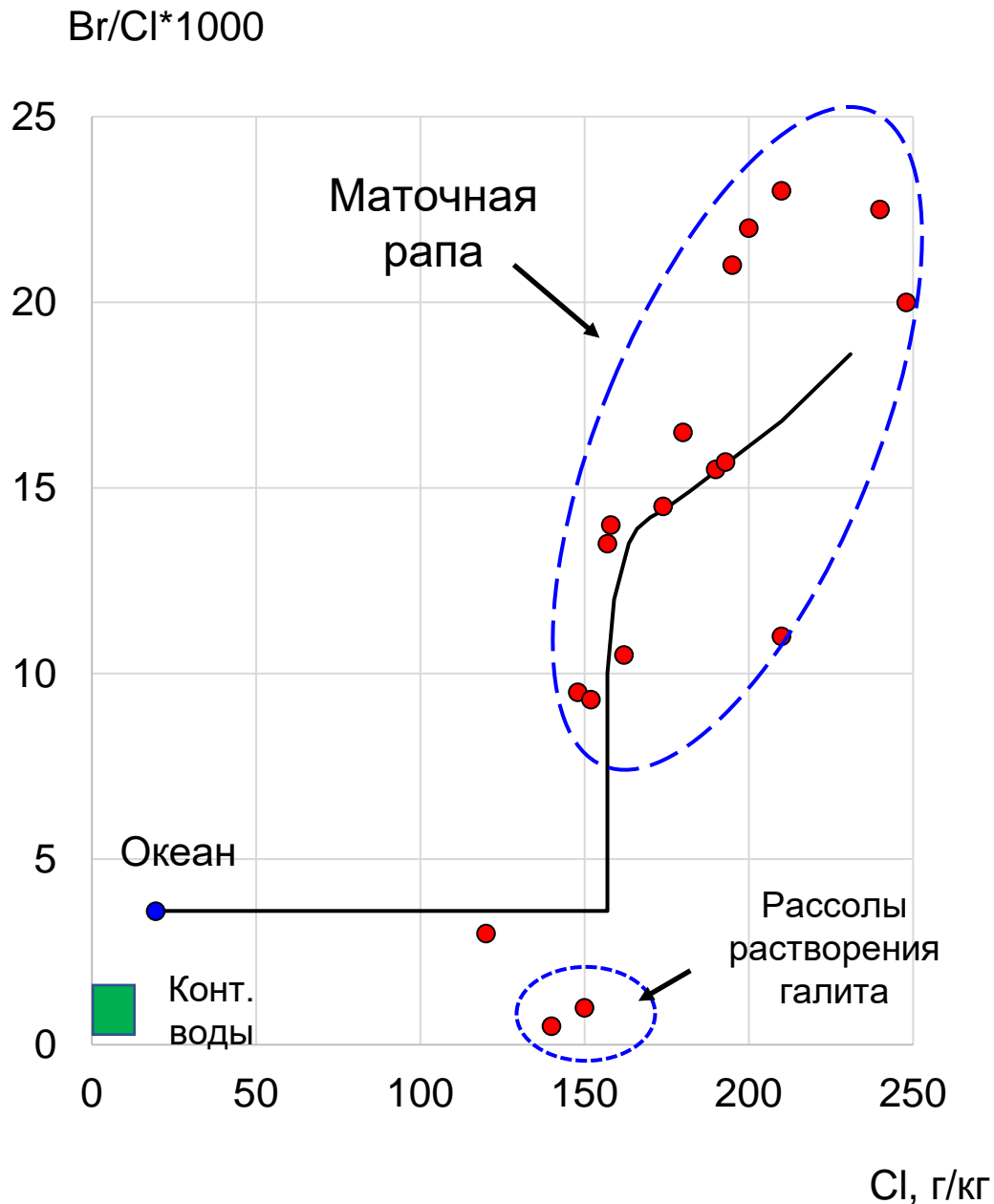
Часть гидросферы	Объем воды, млрд. куб. км		Доля в мировых запасах пресной воды, %
	соленая	пресная	
Мировой океан	1420		
Подземные воды	190	10,5	32,2
Ледники		22	67.4
Озера	0,41	0,09	0.3
Реки		0,002	0,006
Вода в атмосфере		0,013	0.04
Всего:	1610	32	



Морская и континентальная ветви вод

Морская ветвь наследует солевую массу от океана.

Континентальная ветвь получает воду от атмосферных осадков, а солевую массу приобретает от растворения пород земной коры.



Наиболее надежный индикатор происхождения воды - бром/хлорный коэффициент.

В морской воде и производных от нее рассолах отношение $Br/Cl > 0.003$. В водах континентальной ветви это отношение находится на уровне 0,0005.

Причина этого различия: при кристаллизации галита Br плохо входит изоморфно в твердую фазу (при $25^{\circ}C$ $K_D=0.045$). Для континентальных вод источником Cl и Br в большой мере является растворение эвапоритов, что и приводит к низким величинам отношения Br/Cl.

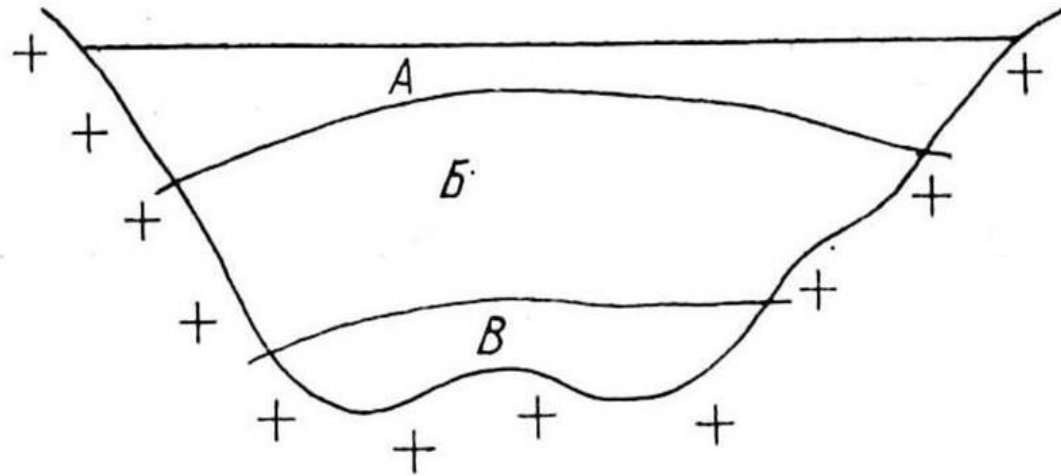
Линия – экспериментальные данные по испарению морской воды (Валяшко и др., 1965)

Точки – рассолы Иркутской синеклизы (эвапоритовая толща средне-кембрийского возраста)

Пути поступления морской воды и продуктов ее испарения в осадочную оболочку суши:

- в составе осадочных отложений в виде поровой воды;
- в ходе морских трансгрессий;
- посредством струйного течения тяжелых эвапоритовых рассолов в осадочных толщах.

Прямая гидрохимическая зональность

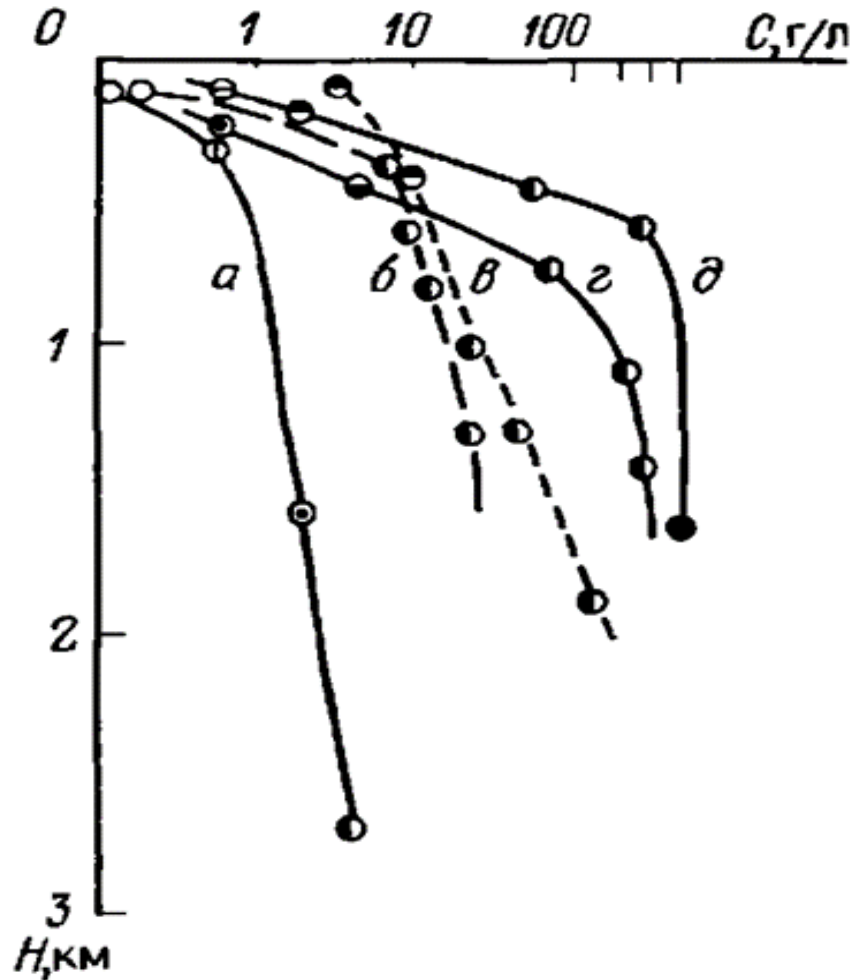


Принципиальная схема гидрогеохимической зональности гидрогеологических бассейнов.
А – пресные воды, Б – соленые воды, В - рассолы

Главная закономерность в распределении составов подземных вод – прямая гидрогеохимическая зональность:

с глубиной в Земной коре минерализация подземных вод возрастает.

Прямая гидрохимическая зональность



Проявления гидрохимической зональности в различных артезианских бассейнах.

а – Байкальский

б – Западно-Сибирский

в – Каракумский

г – Московский

д – Ангаро-Ленский

Корреляция между характером движения, соленостью и гидрохимическим обликом подземных вод при прямой гидрохимической зональности

Зона	Характер движения	Соленость	Типичные составы
Верхняя	Активное	Пресные	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$
Средняя	Замедленное	Солоноватые и соленые	$\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ Cl-Na-Ca
Нижняя	Застойное	Рассолы	Cl-Na-Ca Cl-Ca-Na Cl-Na

Гипотезы о природе прямой гидрохимической зональности подземных воды

Эндогенная гипотеза (Э.Зюсс, В.А.Кротова и др.) – поступление флюидов из глубин Земли (не получила подтверждения).

Диффузионно-осмотическая гипотеза (П.Н.Палей, А.А.Карцев и др.) – вытеснение воды через глинистые толщи с задержкой солей (не согласуется с экспериментальными данными).

Подземное концентрирование (В.А.Сулин, М.Е.Альтовский и др.) – испарение и вынос воды подземными газами, вымораживание (недостаточный масштаб процесса в природе).

Гипотеза дифференциации ионов (К.В.Филатов) – гравитационное опускание атомов в соответствии с их ионной плотностью (противоречит зональности по катионам).

Постепенное растворение минералов земной коры и концентрирование воды (К.Е.Питьева и др.) (недостаточная распространенность хлора в литосфере).

Гидратация минералов коры при взаимодействии вода-порода (С.Р.Крайнов) (недостаточный масштаб процесса в природе).

Гравитационное опускание рассолов («струйное течение») (М.Г.Валяшко, А.И.Поливанова). Положение тяжелых соленых вод внизу разреза отвечает гравитационной устойчивости системы. Возможность струйного перетекания (без перемешивания) доказана экспериментально и многочисленными наблюдениями в природе.

Пример современного струйного течения техногенных рассолов

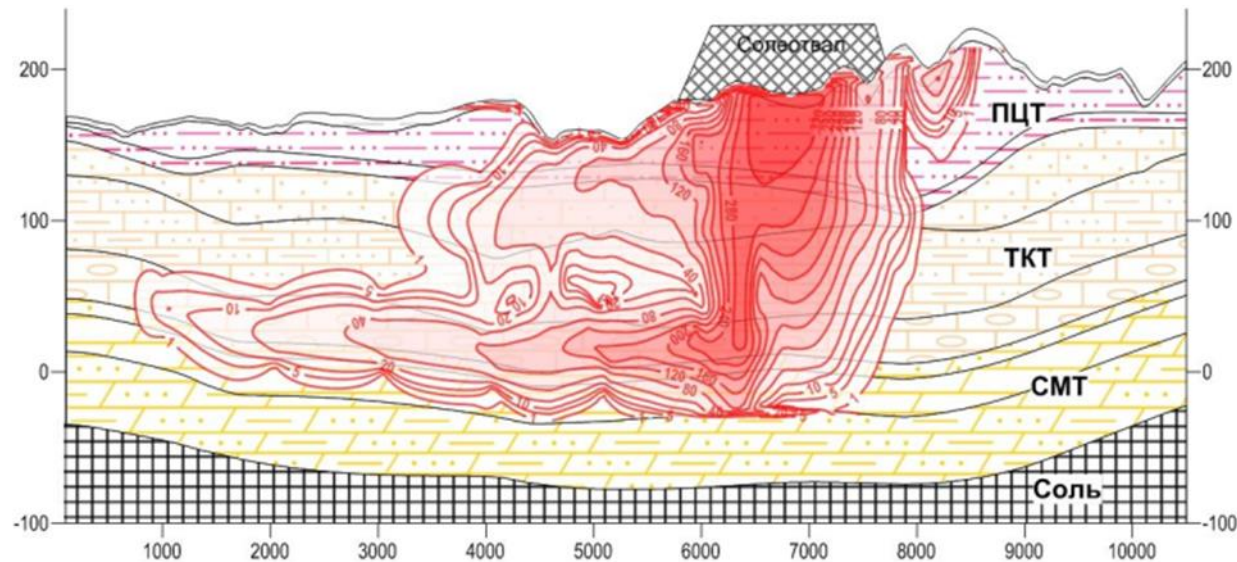


Схема распространения соленых вод высокой плотности от хвостохранилища (По А.В.Лехову, на основе данных Мироненко и др., 1988).

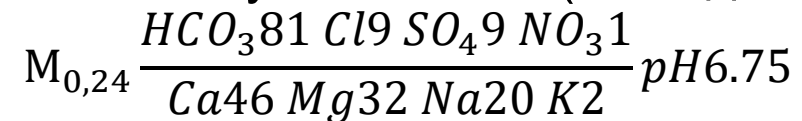
Грунтовые воды

Воды верхнего водоносного горизонта (грунтовые, воды зоны гипергенеза) образуются из атмосферных осадков. Их химический состав формируется за счет растворимых веществ почвы, с участием растительности и почвенных организмов, с учетом транспирации и испарения почвенной влаги.

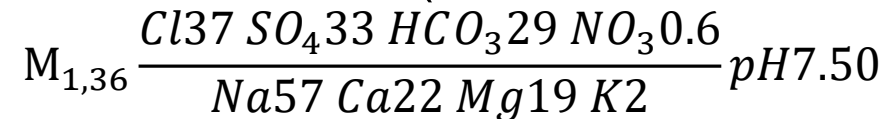
Вследствие этого их состав подчиняется климатической зональности, аналогично составу атмосферных осадков и рек.

Мировые данные по составу вод зоны гипергенеза были обобщены С.Л.Шварцевым (1978, 1998). Им были выделены 5 климатических провинций (4 для климатических зон избыточного увлажнения и 1 для засушливого климата).

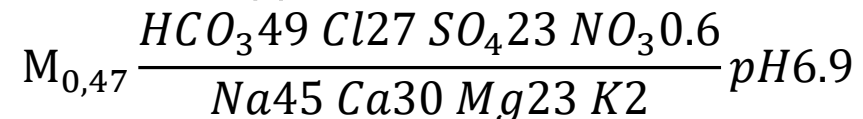
Средний состав для зон избыточного увлажнения (= «воды выщелачивания»):



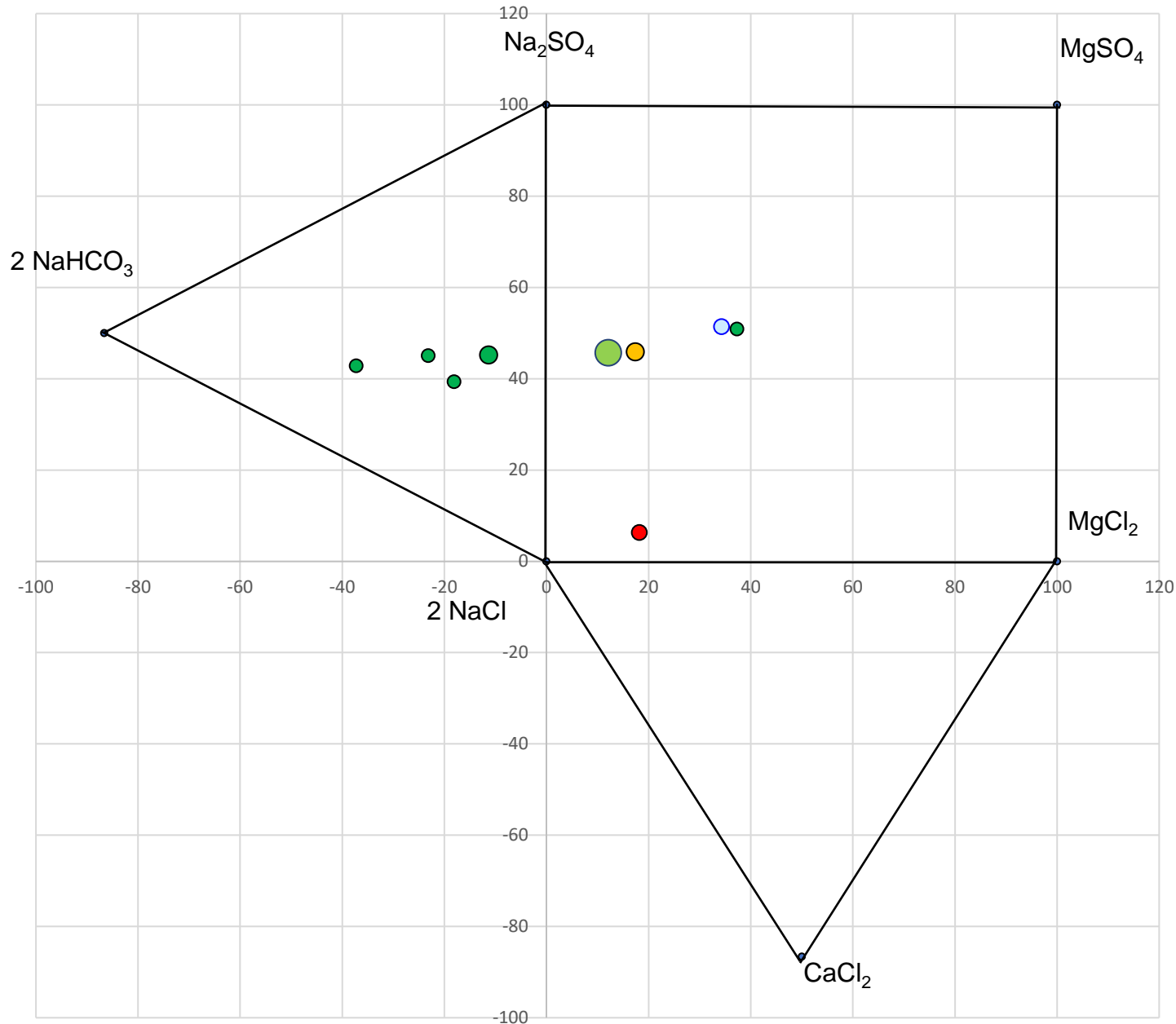
Средний состав для засушливого климата (= «воды континентального засоления»)



Среднемировой состав грунтовых вод:



Воды зоны гипергенеза



Положение составов грунтовых вод на диаграмме Валяшко.

По данным С.Л.Шварцева (1998).

Обозначения:

- средний состав грунтовых вод;
- воды зон избыточного увлажнения, (по провинциям и средний);
- воды континентального засоления.
- средний состав рек мира;
- состав морской воды.



Карта климатической зональности грунтовых вод России

ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ

- приповерхностные надмерзлотные, 0,1–0,5 м, маломощные (0,5)
- приповерхностные торфяные и неторфяные, 0,2–1,0 м, маломощные (до 2 м)
- болотно-торфяные, 0,2–1,0 м, с мощностью торфяных вод (3,0–10,0 м)
- болотно-торфяные, 0,2–1,0 м, с мощностью торфяных вод (1,0–3,0 м)
- болотно-торфяные, 0,2–1,0 м, с мощностью торфяных вод (1,0–3,0 м и менее 1,0 м)
- почвенные, 1,0–2,0 м
- почвенно-грунтовые, 2,0–5,0 м
- высокогрунтовые, 5,0–10,0 м
- средне-грунтовые, 10,0–20,0 м
- глубоко-грунтовые, 20,0–100,0 м
- почвенные и грунтовые воды в сочетании с болотными, 0,5–5,0 м
- почвенные и грунтовые воды в сочетании с болотными, 0,5–10,0 м
- почвенные и грунтовые воды в сочетании с болотными, 0,5–20,0 м
- грунтовые воды большой мощности (более 10 м)

- Классы грунтовых вод по преобладающим минерализации и химизму ультрапресные, 0,2 г/л (НСО₃; Са; Si; орг. в-во)
- пресные, 0,2–0,5 г/л (НСО₃; Са)
- пресные содовые, 0,5–1,0 г/л (НСО₃; СО₃; Na)
- соленоватые, 1,0–3,0 г/л (смешанный химизм)
- слабосоленые, 3,0–10,0 г/л (SO₄; Са; Na)
- средне- и сильносоленые, 10,0–100,0 г/л (SO₄; Cl; Na; Mg)
- Кислотность-щелочность
- К кислые
- XII кислые и нейтральные
- Н нейтральные и щелочные
- Кислородность-глеевость
- к кислородные
- х кислородные и глеевые
- + глеевые

Категории грунтовых вод по фазовому состоянию

Категории	Область распространения
♦ исключительно сезонно-талые	сплошной мерзлоты
◊ преимущественно сезонно-талые	с редкими талыми
◊ постоянно-талые и сезонно-талые	разобщенной мерзлоты с талыми
◊ постоянно-талые	островной мерзлоты
◊ постоянно-талые	немерзлотных области

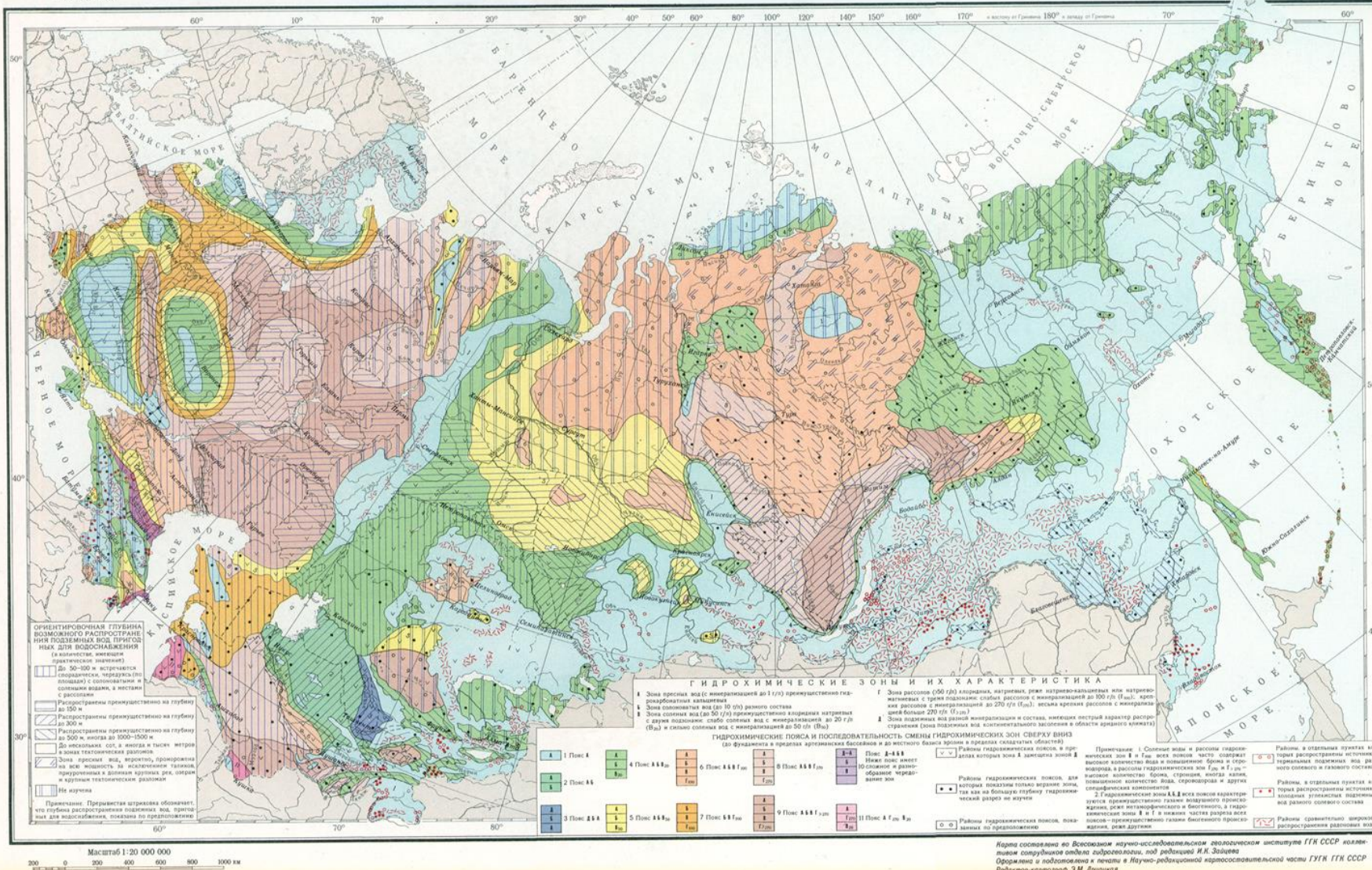
- Формы грунтовых вод по вмещающим породам и рельефу
- пластовые грунтовые воды равнин
 - пластово-трещинные грунтовые воды гор
 - Граница и номер провинции грунтовых вод
 - Грунтовые воды отсутствуют

Масштаб 1:30 000 000

Провинции грунтовых вод

- I арктическая провинция с отсутствием грунтовых вод
- II тундровая провинция почвенных надмерзлотных преимущественно пресных кислых вод
- III провинция приповерхностных надмерзлотных преимущественно ультрапресных кислых вод областей сплошной мерзлоты
- IV провинция болотно-торфяных сезонно-талых и мерзлых пресных кислых глеевых вод
- V провинция пластово-трещинных и пластовых почвенно-грунтовых преимущественно надмерзлотных вод областей разобщенной мерзлоты
- VI провинция пластовых почвенно-грунтовых сезонно-талых и постоянно-талых вод областей островной мерзлоты
- VII провинция болотно-торфяных непромерзающих пресных кислых глеевых вод
- VIII провинция пластовых почвенно-высокогрунтовых пресных грунтовых вод в сочетании с болотными водами таежной зоны
- IX провинция пластовых высокогрунтовых соленоватых вод, дренированных лесостепей и степей
- X провинция пластовых высокогрунтовых соленоватых преимущественно содовых вод слабодренированных лесостепей и степей
- XI провинция пластовых высокогрунтовых соленых вод слабодренированных полупустынь
- XII провинция пластово-трещинных высокогрунтовых пресных кислородных вод гор и предгорий внемерзлотных областей

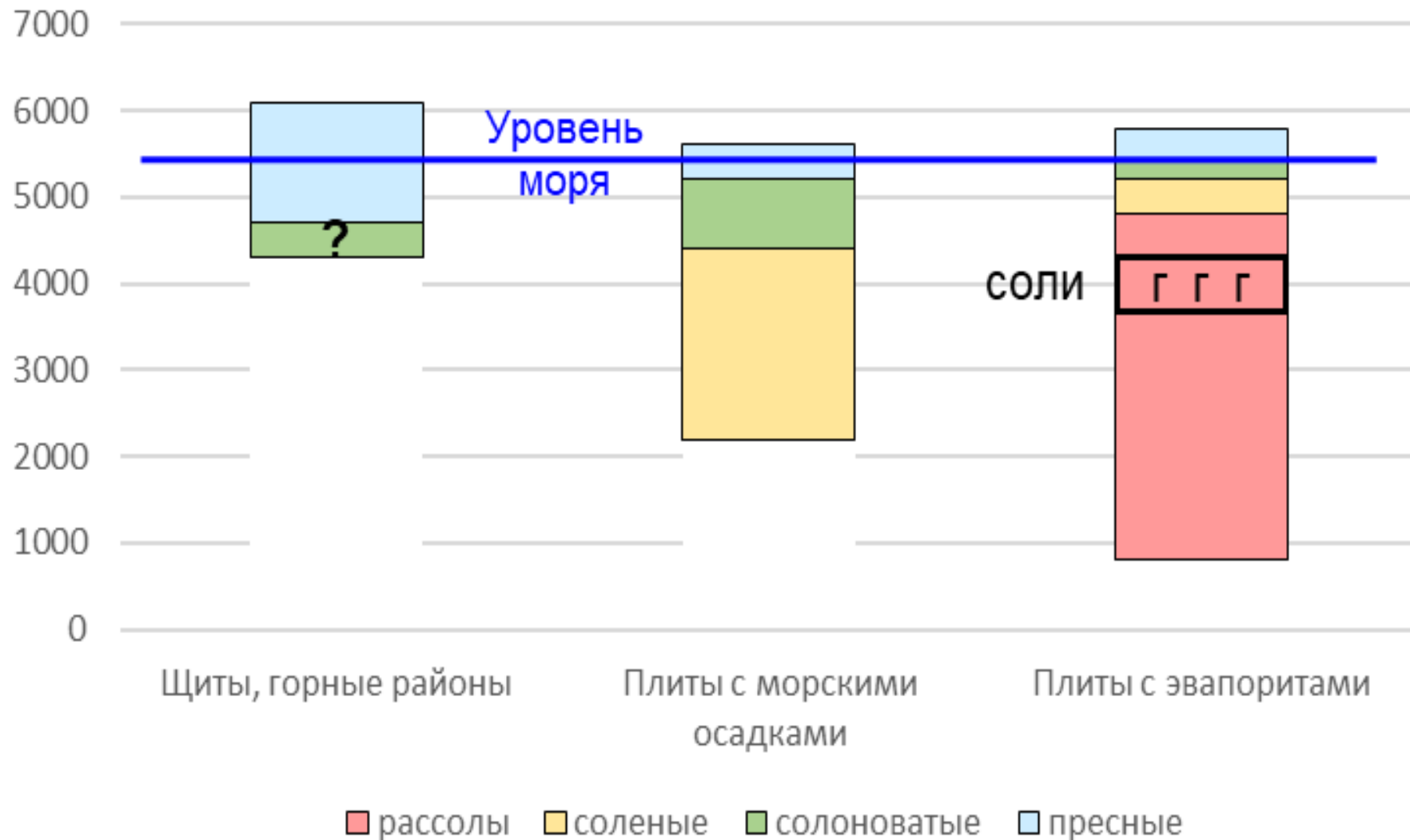
Химический состав подземных вод



Гидрогеохимическая карта Российской Федерации и стран СНГ

На карте цветом показана минерализация подземных вод самого нижнего водоносного горизонта в осадочном чехле (для гидрогеологических массивов – минерализация трещинных вод)

Типы гидрохимического разреза



Типы гидрохимического разреза и связь с геологическим развитием региона.

Соленые воды платформ без эвапоритов в разрезе – седиментационные воды морского генезиса.

Преобразование поровых вод морских отложений при диагенезе и катагенезе

Состав воды мирового океана в фанерозое описывается формулой Курлова:

$$M_{35} \frac{Cl \ SO_4 \ HCO_3}{Na \ Mg \ Ca \ K}$$

На стадии диагенеза вследствие сульфат-редукции вода теряет SO_4^{2-} и накапливает HCO_3^- , Ca связывается в карбонаты, K – в глинистые минералы. Формула Курлова приобретает вид:

$$M_{32} \frac{Cl \ HCO_3}{Na \ Mg}$$

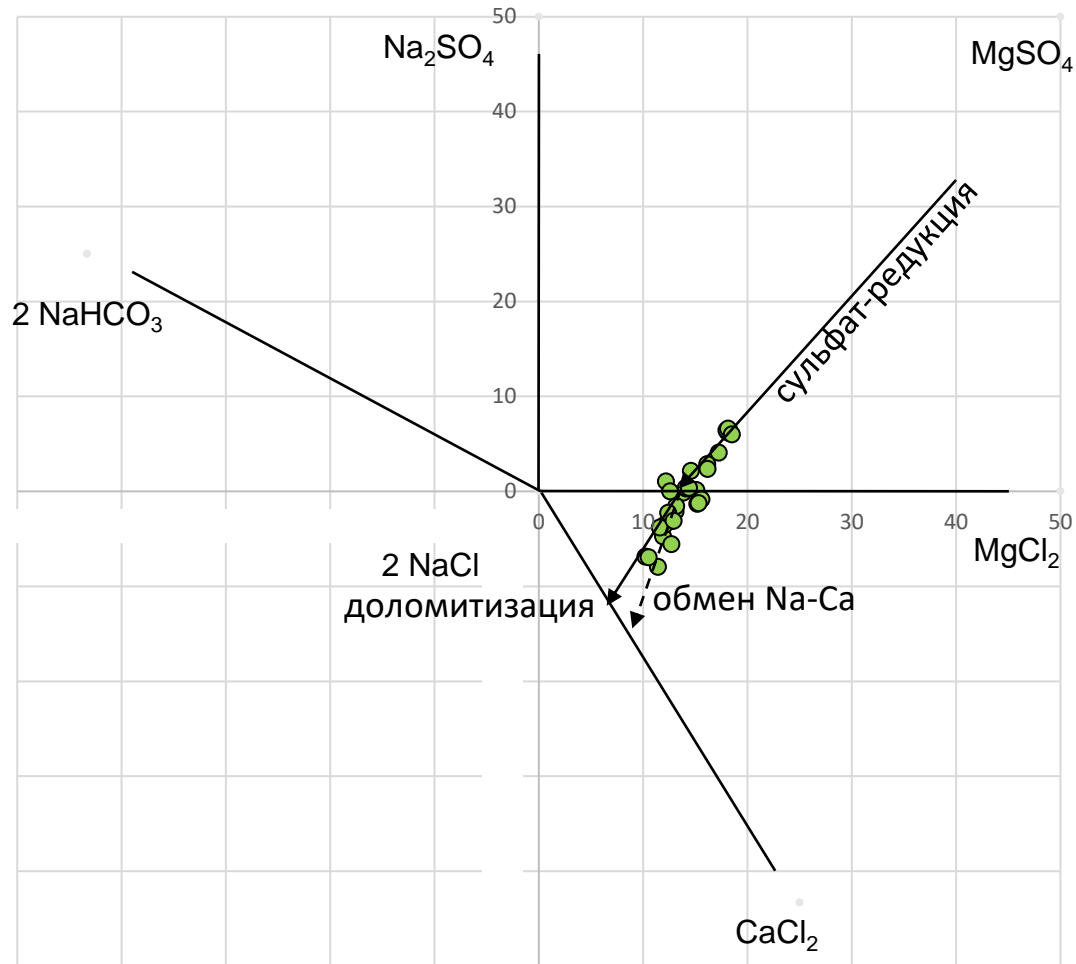
При катагенезе направление эволюции меняется, в раствор из породы переходит Ca в обмен на Mg и частично Na, HCO_3^- связывается в карбонатный цемент. При этом тип поровой воды меняется из сульфатного в хлоридный, и формула Курлова становится:

$$M_{33} \frac{Cl}{Na \ Ca}$$

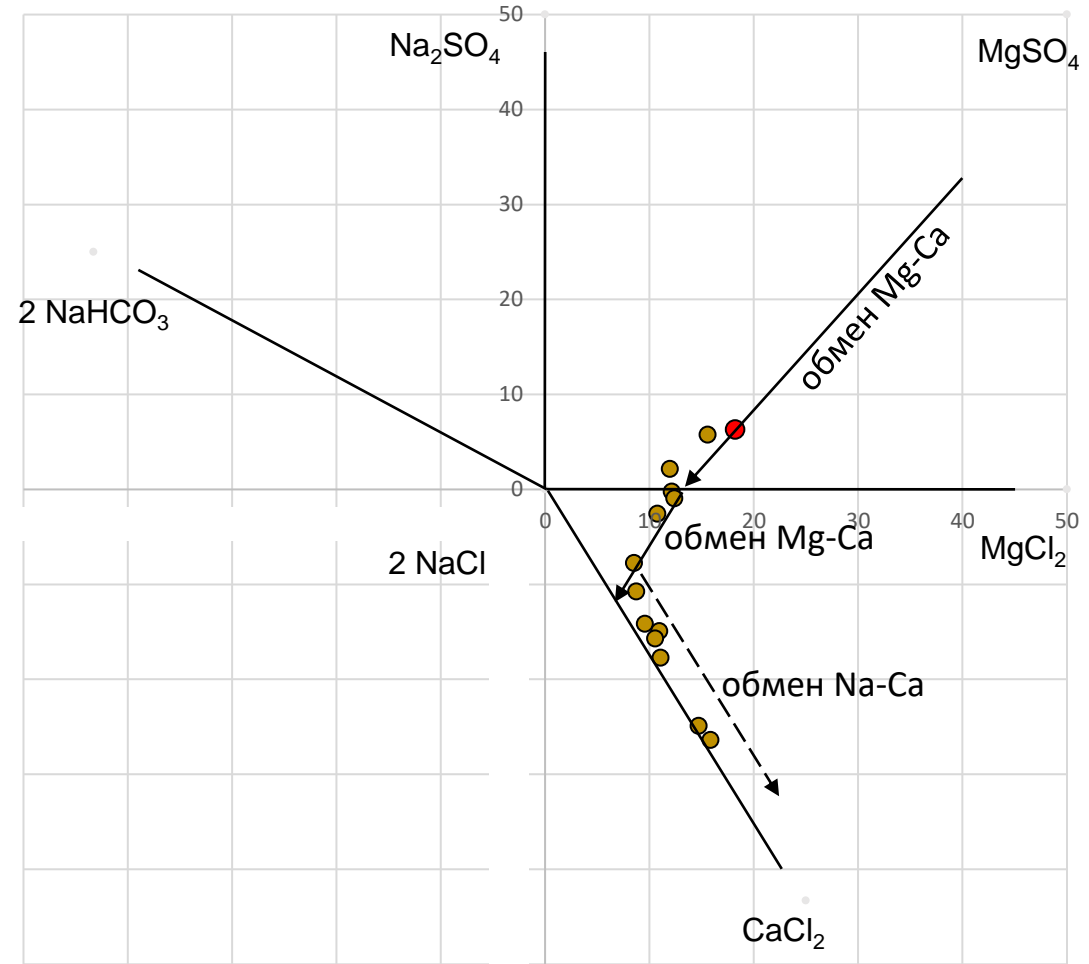
Таким образом, седиментогенные воды морских осадочных пород будут иметь кальциево-натриевый хлоридный состав.

Поровые воды океанских осадков

Карбонатно-терригенные породы

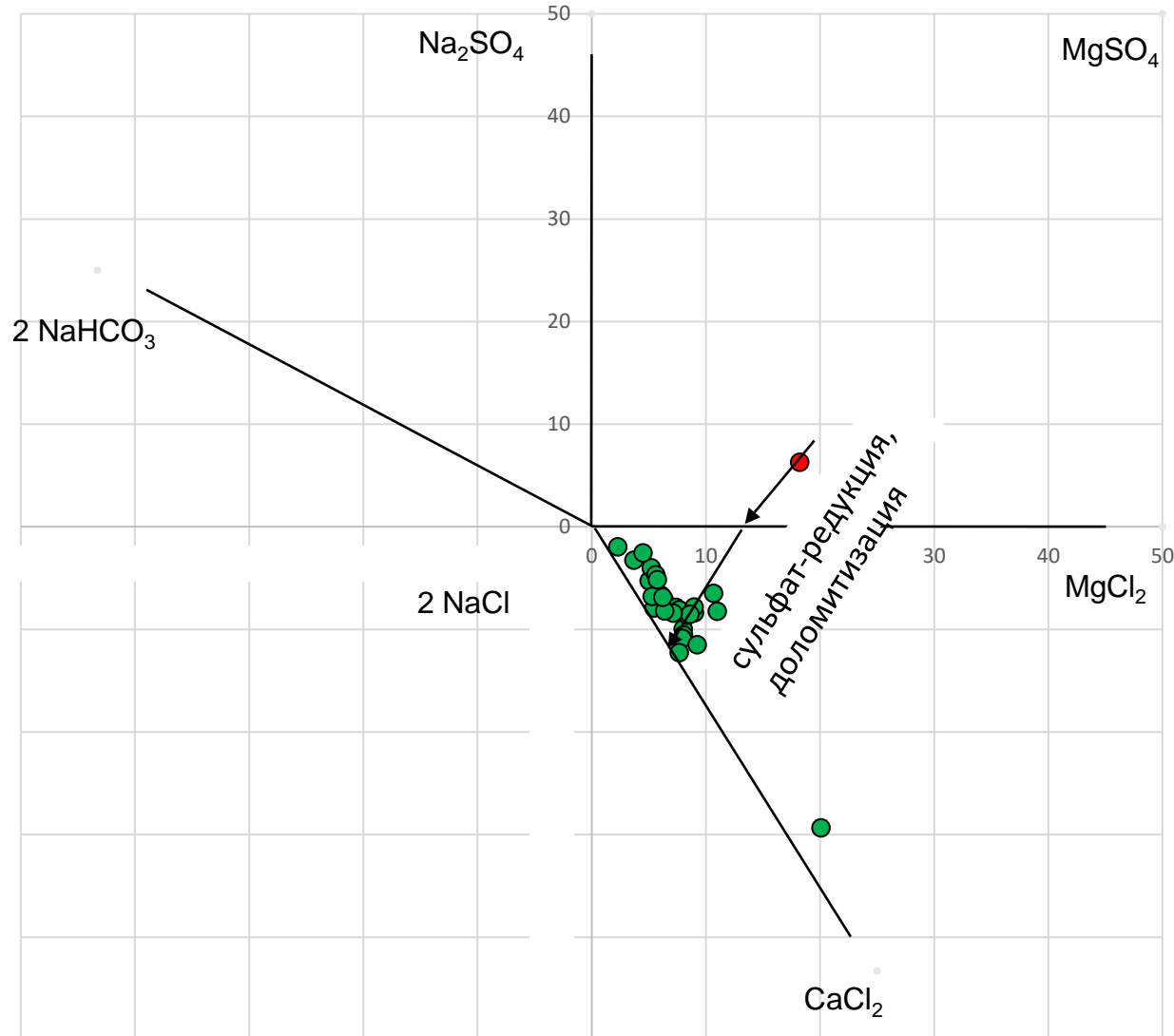


Вулканогенные породы



В карбонатно-терригенных осадках при диагенезе состав поровой воды изменяется сульфат-редукцией, а затем доломитизацией. Скв. 178 и 180 рейса 18 DSDP (Waterman et al., 1974). Глубина в осадках 718 и 456 м, соответственно. В вулканогенных осадках и породах поровые воды при реакции с алюмосиликатами обменивают сначала Mg на Ca породы, а при его исчерпании – Na на Ca. Скв. 325 рейса 35 DSDP (Gieskes, Lawrence, 1976). Глубина в осадках 710 м. Стрелками показаны теоретические пути изменения раствора при обменных реакциях.

Подземные воды юрских отложений Западной Сибири



Точки состава подземных вод самой глубокой части Западно-Сибирского мегабассейна находятся именно там, куда они должны были прийти при катагенетических изменениях поровой воды морского генезиса.

Происхождение подземных рассолов

- I. Метаморфизованная маточная рапа древних солеродных бассейнов («подсолевые»).
- II. Рассолы растворения эвапоритовых толщ («надсолевые»).

Глобальное распространение галитовых эвапоритов (Warren, 2016)



Гидрохимическое строение Сибирской платформы (По Букаты, 2009)

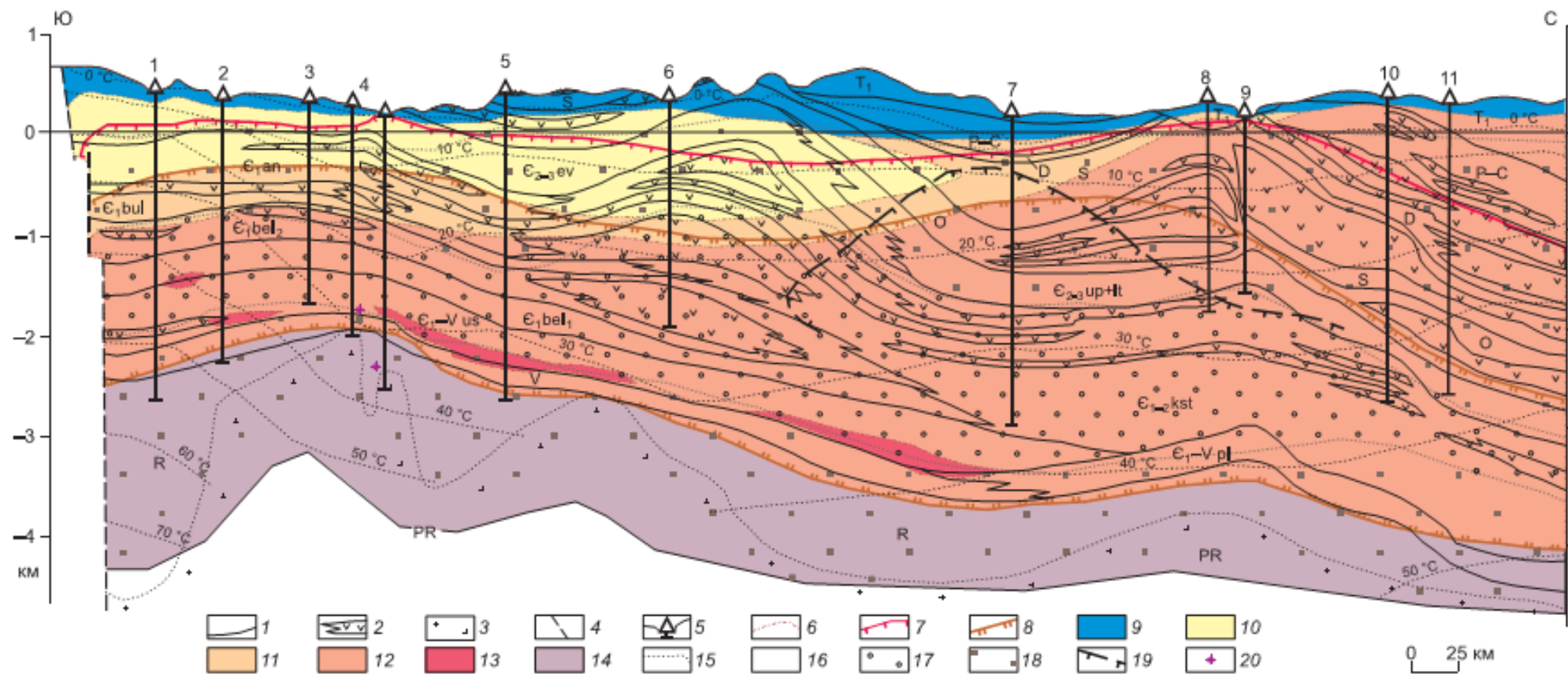
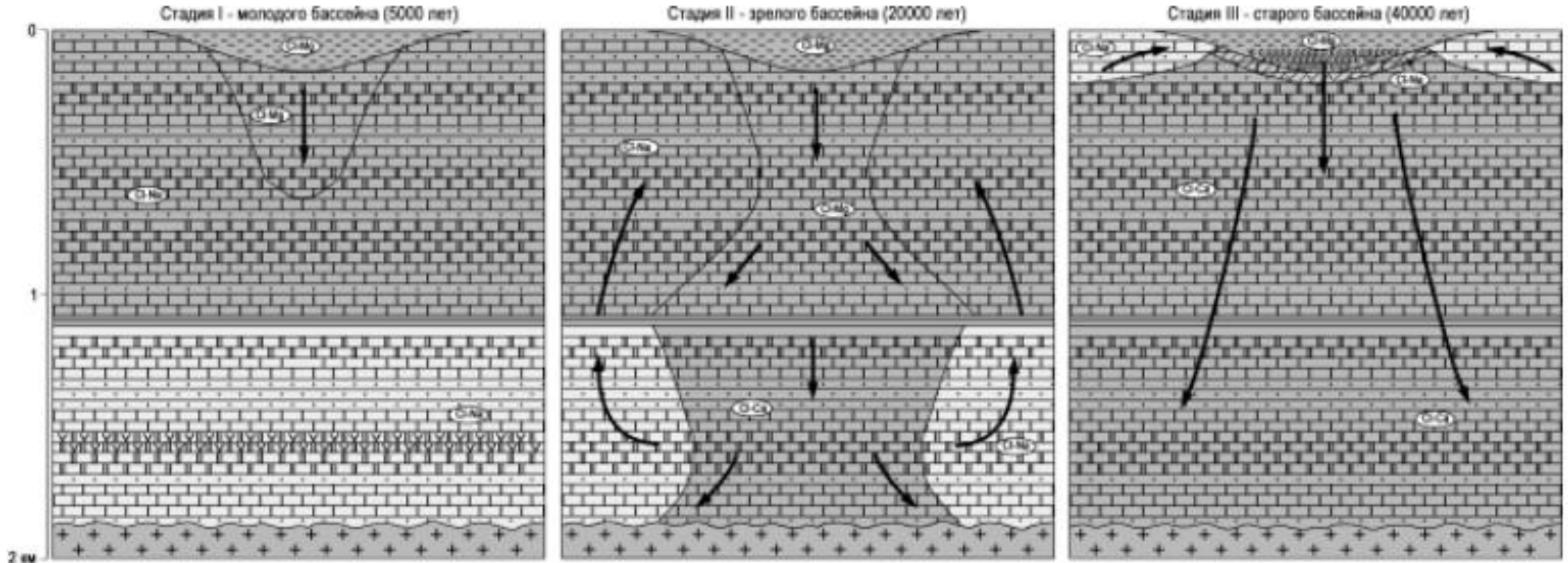


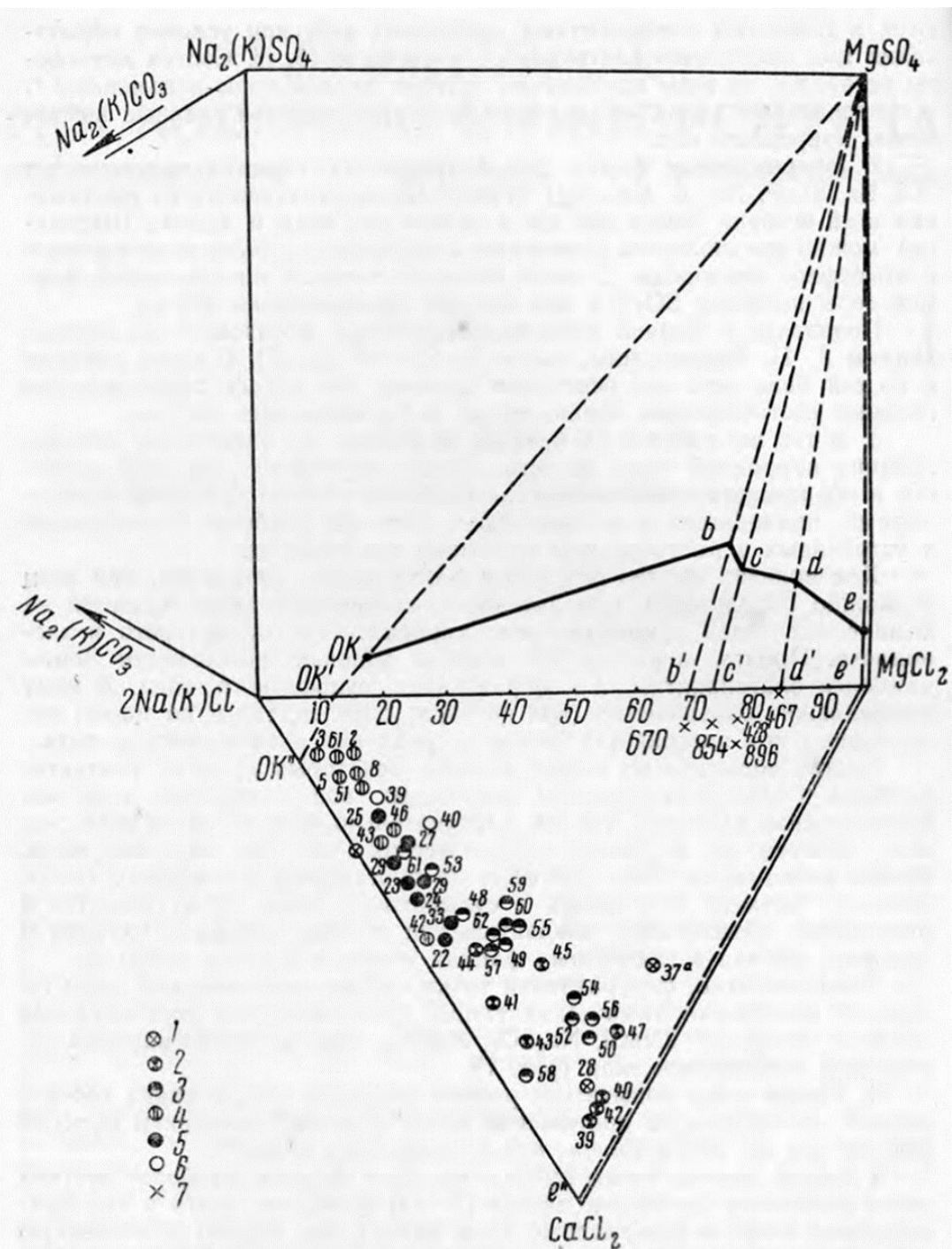
Рис. 3. Субмеридиональный гидрогеохимический разрез западной части Сибирской платформы.

1 — границы стратиграфических подразделений; 2 — интрузии и покровы траппов; 3 — кристаллический фундамент; 4 — разрывные нарушения бортов платформы; 5 — глубокие скважины. Состав вод: 6 — границы химических типов вод; 7 — верхняя граница распространения рассолов ($M > 35$ г/л); 8 — граница распространения весьма крепких рассолов ($M > 320$ г/л); 9 — пресные и слабосоленые воды гидрокарбонатного и сульфатного состава; 10 — хлоридные натриевые соленые воды и рассолы; 11 — хлоридные кальцево-натриевые, натриево-кальциевые, реже натриевые рассолы; 12 — хлоридные натриево-кальциевые рассолы; 13 — хлоридные кальциевые рассолы; 14 — хлоридные натриевые и кальцево-натриевые рассолы нижней части осадочного чехла. Состав водорастворенных газов: 15 — границы зон с различным составом газов; 16 — кислородно-азотный, азотный, реже углеводородно-азотный; 17 — азотно- и углеводородно-кислотный; 18 — углеводородный; 19 — контур распространения сухих углеводородных газов (с коэффициентом сухости > 50); 20 — локальные проявления газов окислительно-азотного состава. Скважины: 1 — Верхнетохомская 1, 2 — Оморинская 1, 3 — Юрубенская 1, 4 — Куомбинские 4 и 5, 5 — Байкитская 1, 6 — Полигусская 1, 7 — Тутончанская 1, 8 — Нижнетунгусская 3, 9 — Анакитская 1, 10 — Верхненимдинская 1, 11 — Онёкская 1.

Струйное течение седиментационных рассолов



Реконструкция механизма плотностной конвекции рассолов раннепермского Верхне-Камского эвапоритового бассейна (Носарева, 2007)



Составы седиментогенных рассолов (метаморфизованной маточной рапы) эвапоритовых бассейнов (Валяшко, 1963).

Нижний кембрий, Иркутская синеклиза:

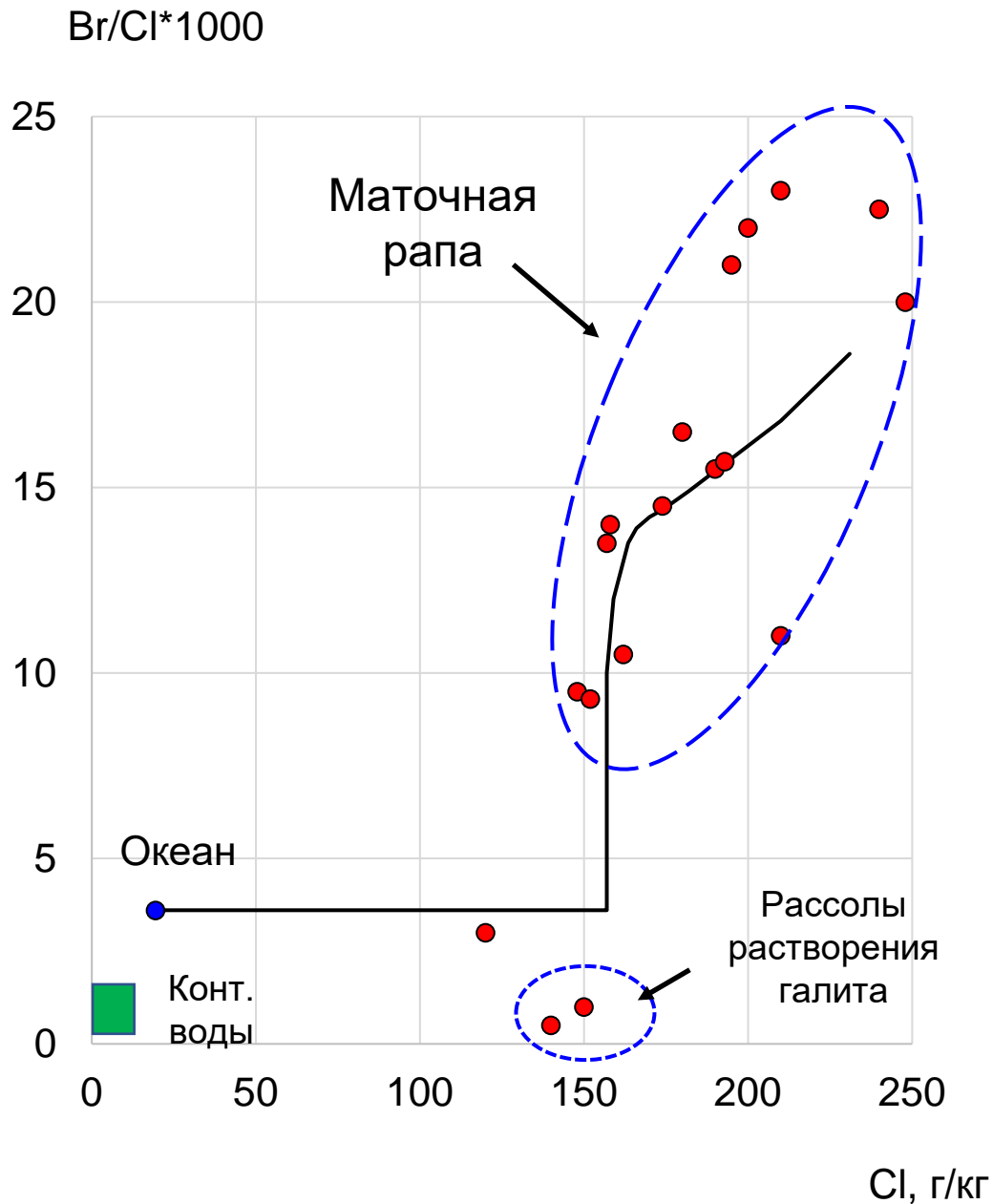
1 – надсолевые; 2 – внутрисолевые; 3 – подсолевые;

Девон, Русская платформа, 4 – подсолевые.

Пермь, Русская платформа, 5 – подсолевые; 6 – внутрисолевые.

Миоцен, Прикарпатье, 7 – внутрисолевые.

Главные механизмы метаморфизации – доломитизация и Mg-Ca-обмен на алюмосиликатах



Значения генетического индикатора Br/Cl для рассолов Иркутской синеклизы (по данным Валяшко и др., 1965).

Точки – рассолы Иркутской синеклизы (эвапоритовая толща средне-кембрийского возраста), соответствующие группам точек 1 - 3 на предшествующем слайде

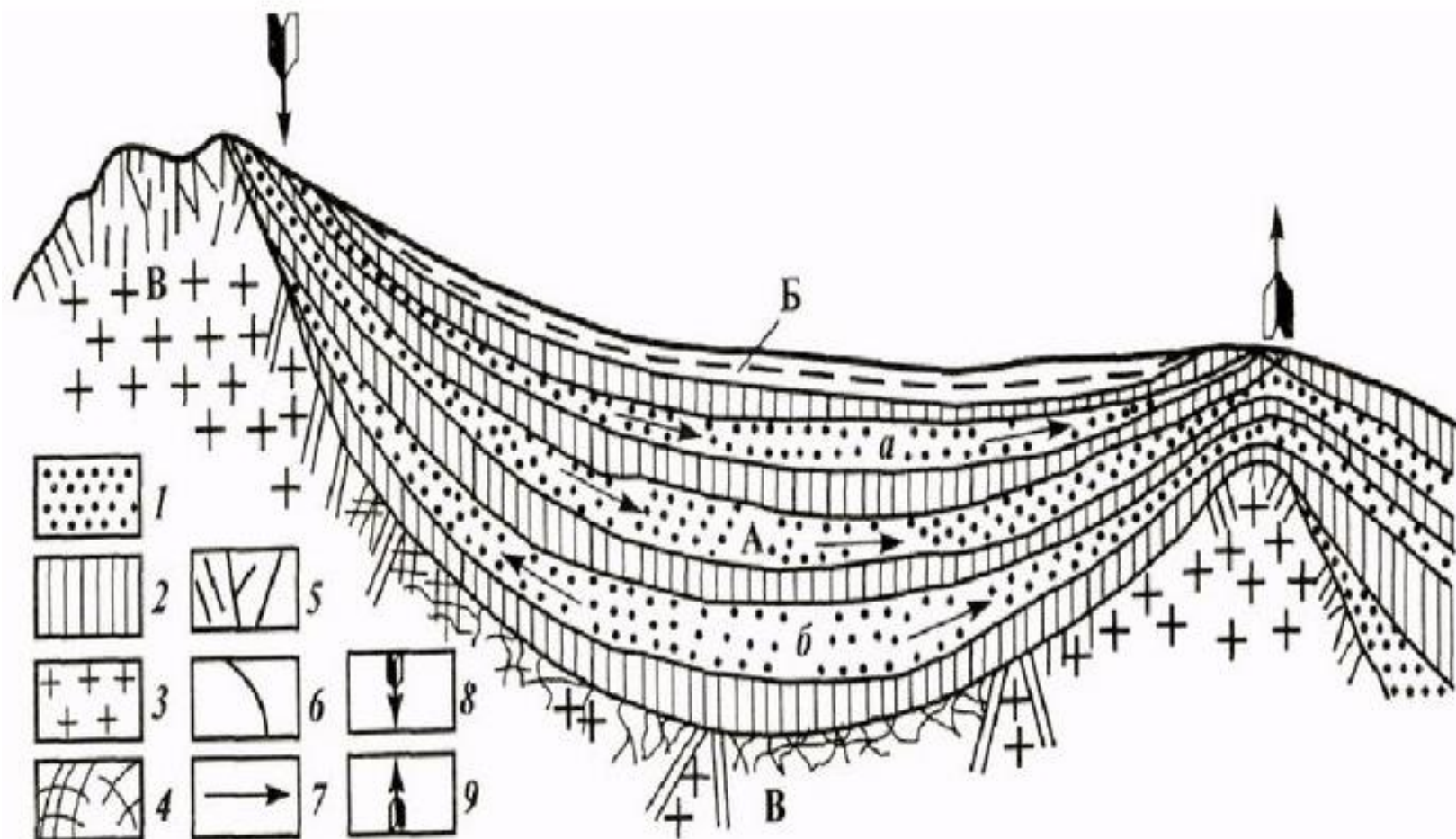
Линия – экспериментальные данные по испарению морской воды

Элизионный и инфильтрационный режимы осадочных бассейнов

Влияние инфильтрации атмосферных осадков.

Подземные воды смешанного генезиса.

Элизионный режим в глубоких частях артезианских бассейнов (По Карцеву и Вагину)



- 1 – коллекторы
- 2 – водоупоры
- 3, 4 – кристаллические породы
- 5, 6 – трещины и тектонические нарушения
- 7 – направления движения пластовых вод
- 8, 9 – области питания и разгрузки

а – инфильтрационный режим
б – элизионный режим

Хлоридно-гидрокарбонатные воды смешанного генезиса в краевых частях артезианских бассейнов

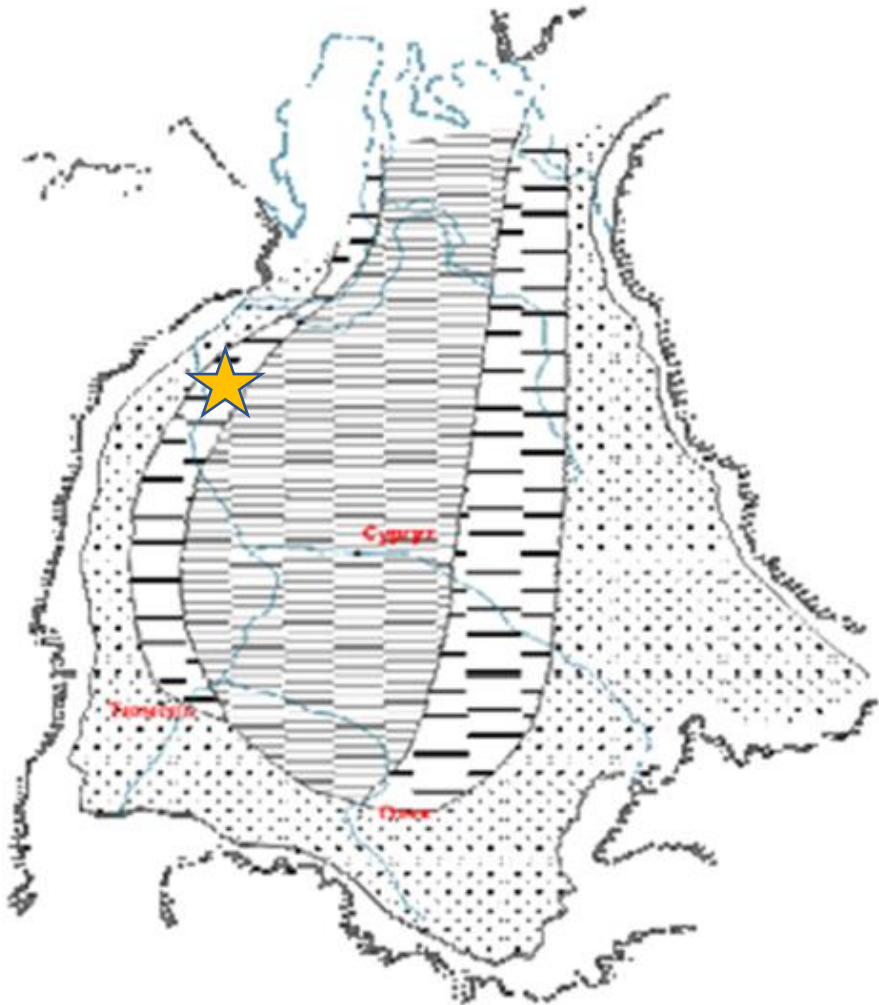
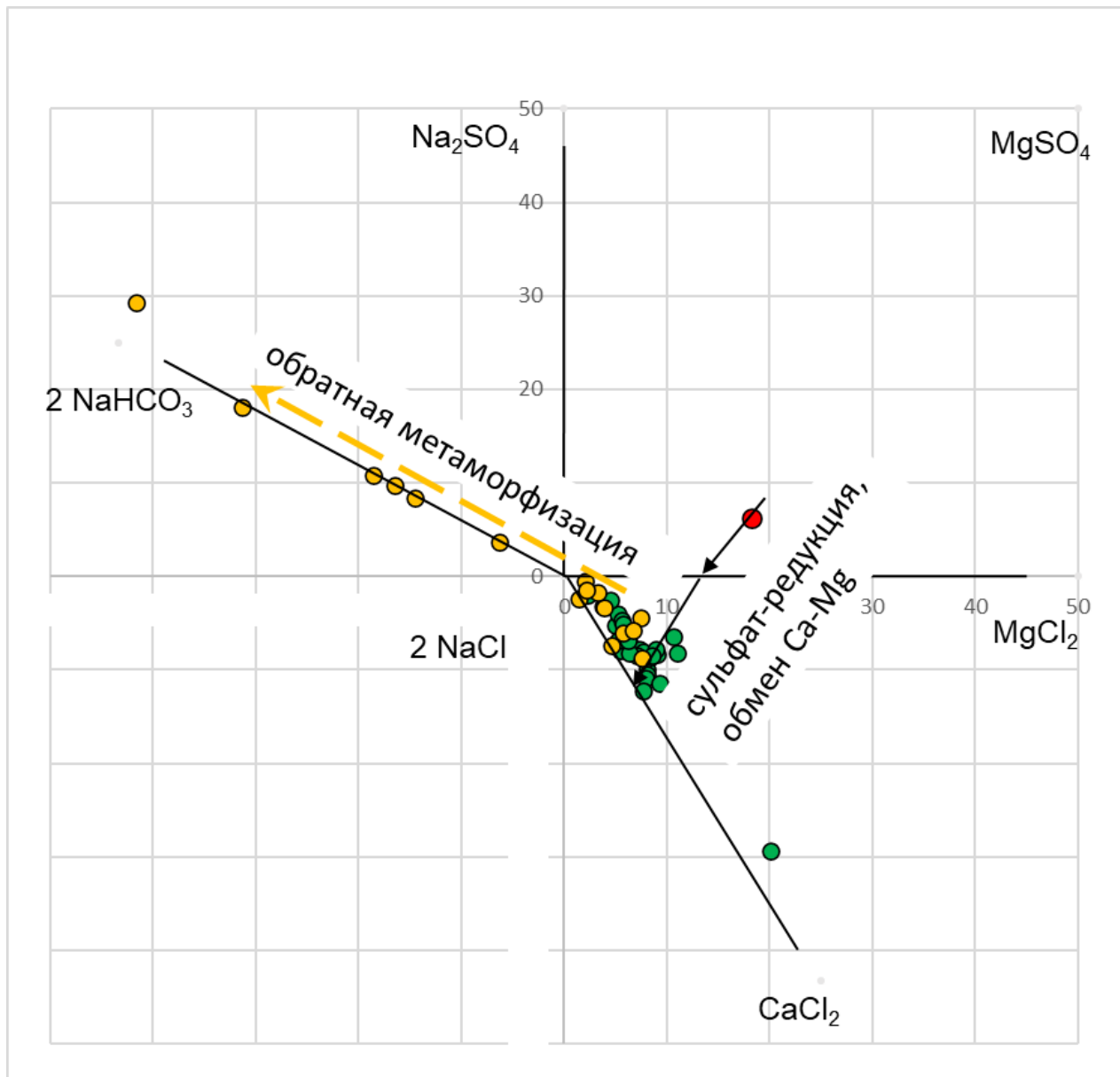


Схема гидрогеологической зональности мезозойского бассейна Западной Сибири (Матусевич, 1976)

Звездочкой показан Березовский нефтегазоносный район на западном борту бассейна.

Воды смешанного генезиса



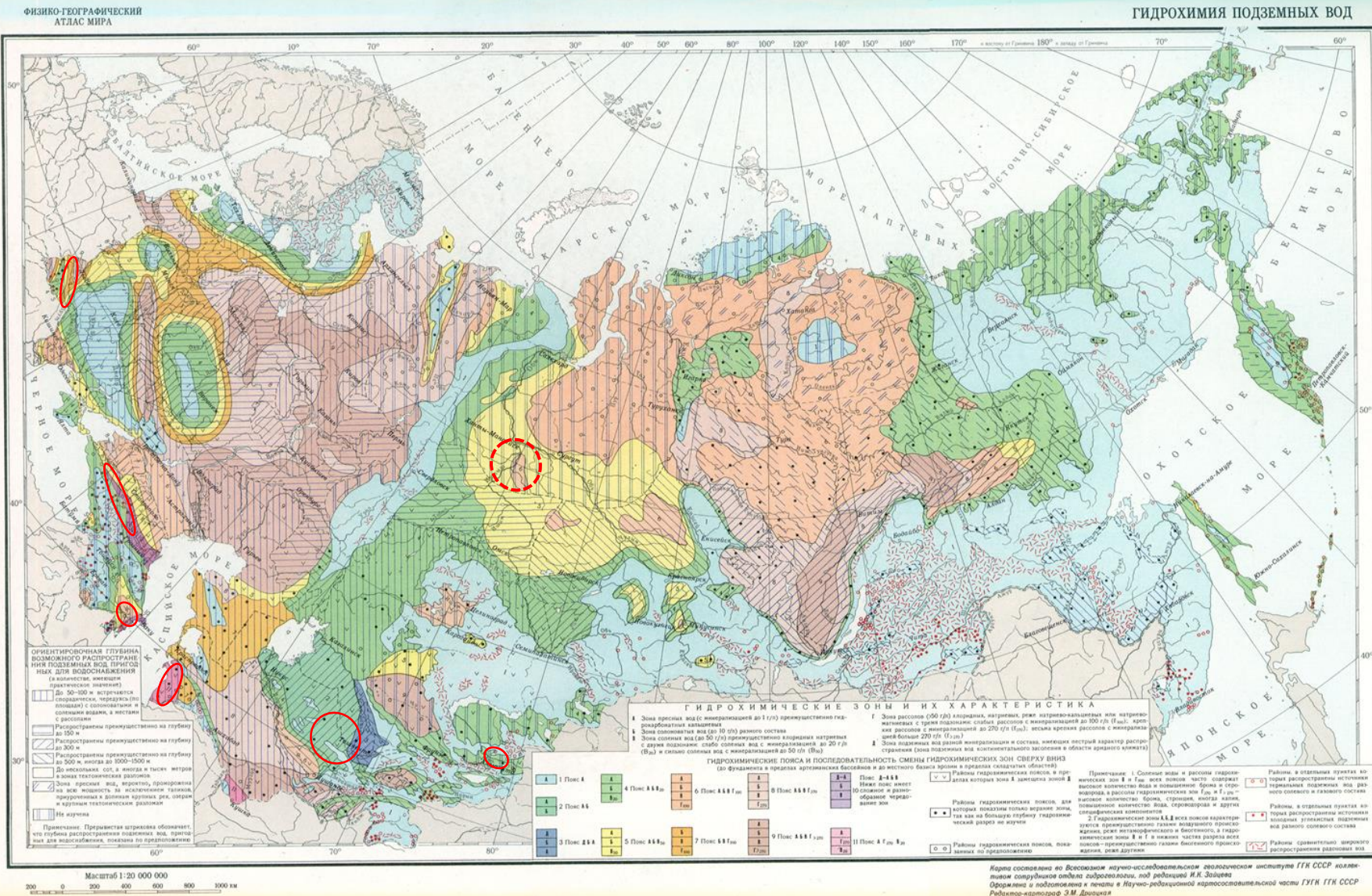
Положение составов вод смешанного инфильтрационно-седиментационного генезиса.

Зеленые точки – седиментогенные воды (по данным Киреевой, Будановой, 2011).

Желтые точки – воды смешанного генезиса краевой части бассейна (по данным Новикова, Сухоруковой, 2009) (Березовский нефтегазоносный район Западно-Сибирского бассейна).

Желтая стрелка – тренд смешанных вод, названный М.Г.Валяшко «обратной метаморфизацией».

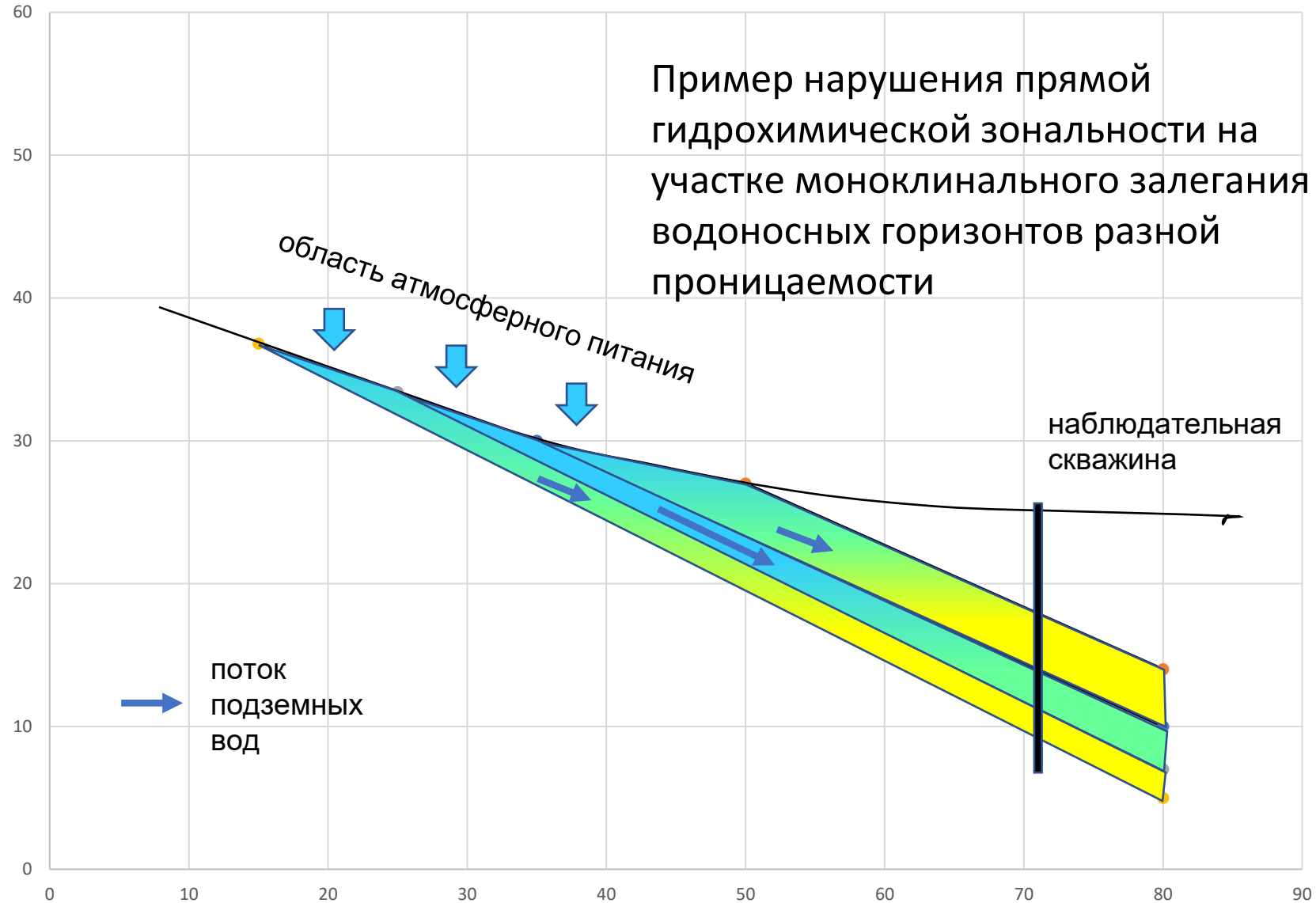
Обратная гидрохимическая зональность



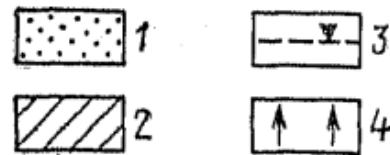
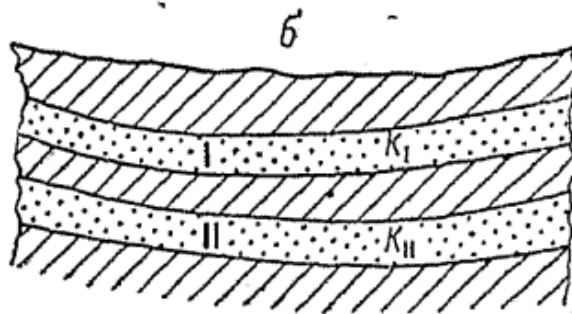
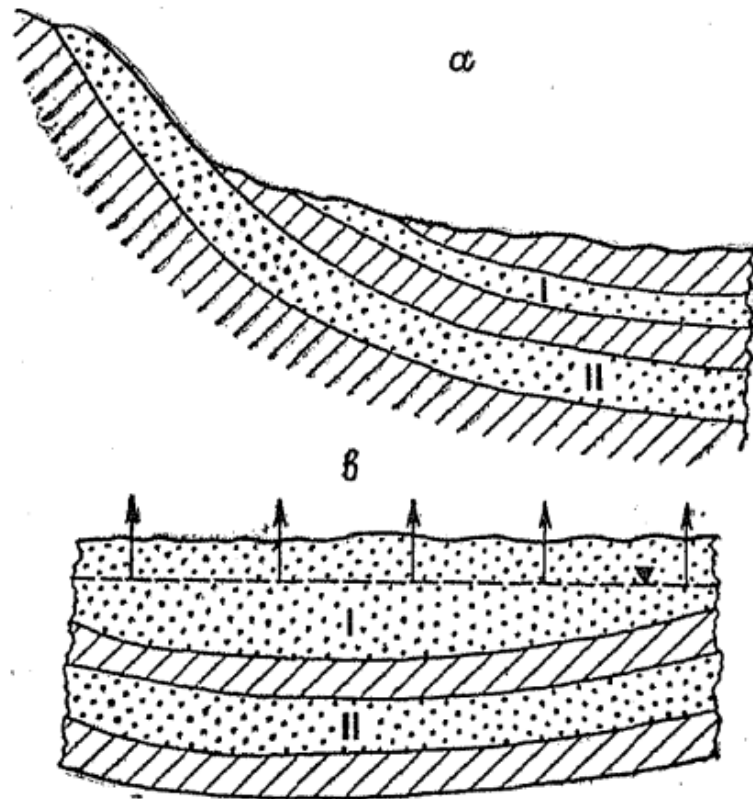
Гидрогеохимическая карта Российской Федерации и стран СНГ

На карте выделены регионы, где установлена инверсия гидрогеохимической зональности («обратная гидрогеохимическая зональность»).

Обратная гидрохимическая зональность



Обратная гидрохимическая зональность



Аномальные гидрохимические разрезы (По Самариной, 1977)

а - различный гидродинамический градиент водоносных пластов;

б - различные коэффициенты фильтрации водоносных пластов при промывке;

в - испарение в аридном климате.

1 - водоносный пласт;

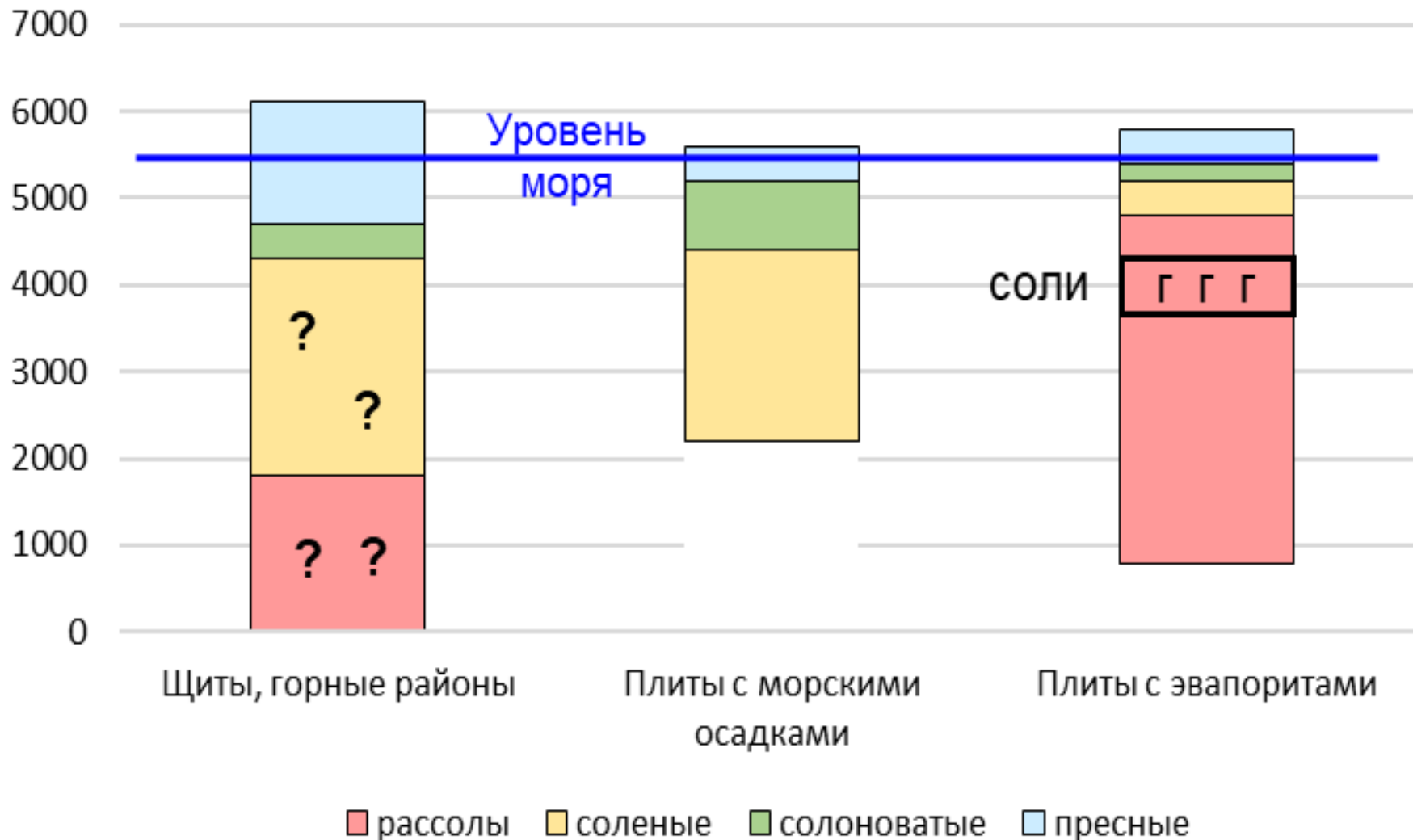
2 - водоупор;

3 - уровень грунтовых вод;

4 - испарение с зеркала грунтовых вод.

Подземные воды в кристаллическом фундаменте
континентальной коры.

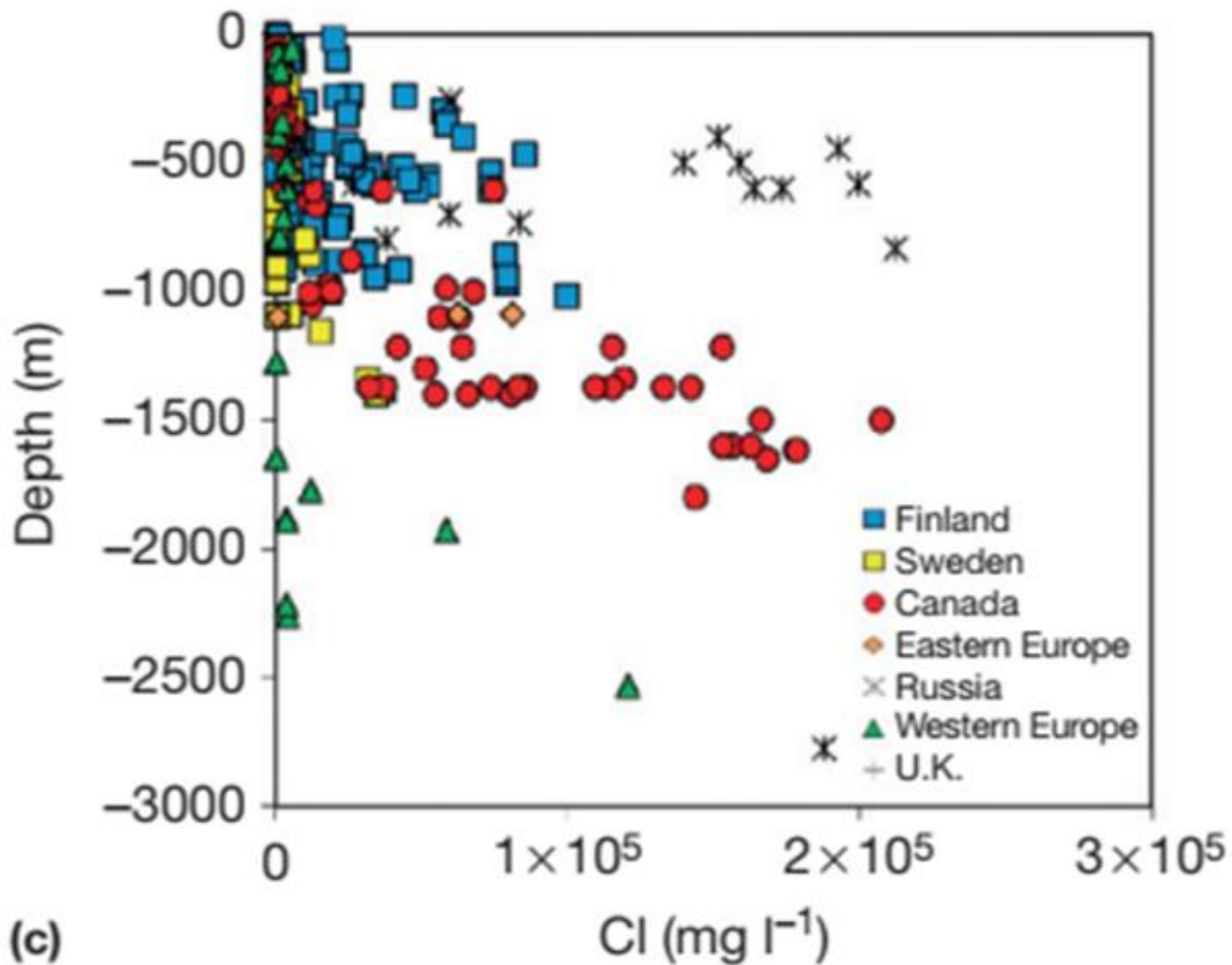
Типы гидрохимического разреза



Вероятное строение гидрохимического разреза на щитах с учетом результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины.

Предположительно, на 4500 м минерализация достигает 200-300 г/л (Cl-Na состав), а ниже 5850 м превышает 300 г/л (Cl-Ca-Na состав). По [Кольская сверхглубокая, 1998]

Рассолы в кристаллическом фундаменте щитов и платформ



Тренды концентрации хлоридов в трещинных водах кристаллической коры различных регионов мира.
(По Frapre et al., 2014)

(c)

Гипотезы о происхождении рассолов в кристаллическом фундаменте

Движущая сила концентрирования	Основные аргументы за/против
<p><u>Взаимодействие вода/порода:</u> Растворение минералов, вымывание флюидных включений, концентрирование воды при образовании вторичных минералов (выветривании)</p>	<p>Недостаточное количество галогенов (Cl, Br) при реальных отношениях порода/вода. Независимость от состава пород (кроме Mg в кимберлитах).</p>
<p><u>Аллохтонные источники рассолов</u> Внедрение морской воды.</p> <p>Внедрение древних эвапоритовых рассолов и рассолов растворения.</p> <p>Внедрение криогенных рассолов ледниковых периодов.</p> <p>Магматические флюиды.</p>	<p>Не объясняется появление рассолов на глубине.</p> <p>Соответствует составу метаморфизованных галогенных рассолов и геохимическим индикаторам (Br/Cl). Не известны древние солеродные бассейны (Скандинавский щит, кратон Каапвааль).</p> <p>Нет свидетельств масштабов криогенного галогенеза, не соответствует определениям древнего возраста рассолов (>1.5 млн. лет по ^{81}Kr) на Скандинавском щите.</p> <p>Нет никаких геохимических аргументов.</p>

Гипотеза криогенного происхождения рассолов в кристаллическом фундаменте щитов и платформ

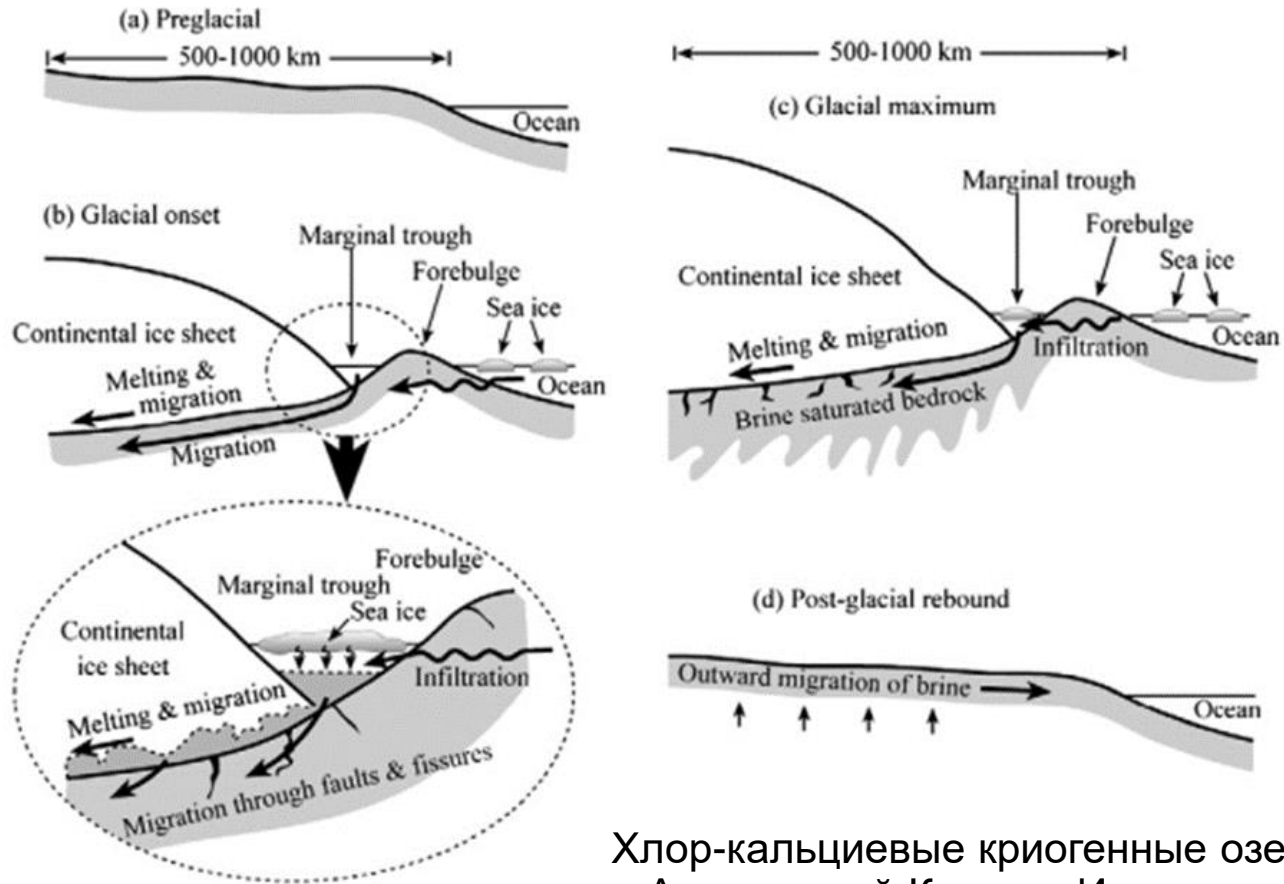


Схема образования и эволюции морского криогенного бассейна на краю ледника (по Starinsky, Katz, 2003).

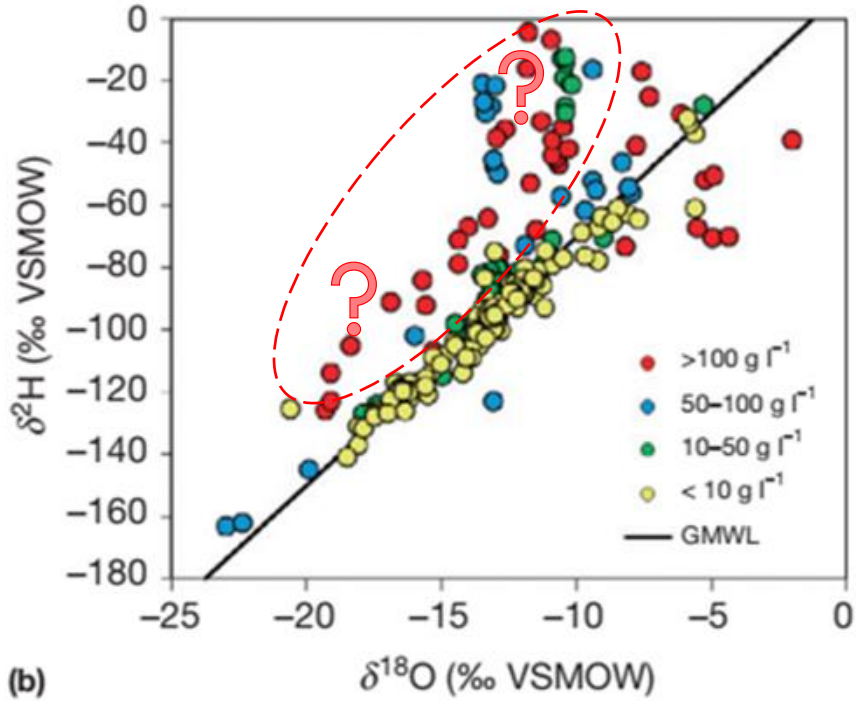
- Граница суша море до начала оледенения.
- Формирование криогенного меромиктического бассейна у края наступающего ледника; на врезке показано инфильтрационной морское питание бассейна и фильтрация образовавшегося криогенного рассола в трещины дна.
- Гляциальный максимум; подстилающие ледник породы пропитаны тяжелым рассолом.
- Послеледниковое изостатическое поднятие суши.

Хлор-кальциевые криогенные озера с морским питанием обнаружены в Антарктиде и Арктической Канаде. Их состав определяется: а) вымораживанием воды, и б) ранней садкой мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) при $t < 0^\circ\text{C}$.

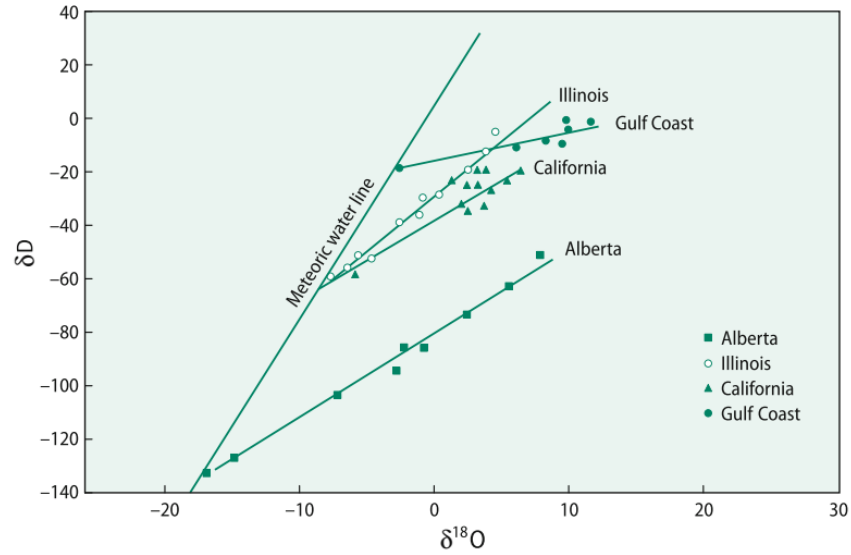
Гипотезы о происхождении рассолов в кристаллическом фундаменте

Движущая сила концентрирования	Основные аргументы за/против
<p><u>Взаимодействие вода/порода:</u> Растворение минералов, вымывание флюидных включений, концентрирование воды при образовании вторичных минералов (выветривании)</p>	<p>Недостаточное количество галогенов (Cl, Br) при реальных отношениях порода/вода. Независимость от состава пород (кроме Mg в кимберлитах).</p>
<p><u>Аллохтонные источники рассолов</u> Внедрение морской воды.</p> <p>Внедрение древних эвапоритовых рассолов и рассолов растворения.</p> <p>Внедрение криогенных рассолов ледниковых периодов.</p> <p>Магматические флюиды.</p>	<p>Не объясняется появление рассолов на глубине.</p> <p>Соответствует составу метаморфизованных галогенных рассолов и геохимическим индикаторам (Br/Cl). Не известны древние солеродные бассейны (Скандинавский щит, кратон Каапвааль). <i>(Недавно обнаружены на периферии Скандинавского щита).</i></p> <p>Нет свидетельств масштабов криогенного галогенеза, не соответствует определениям древнего возраста рассолов (>1.5 млн. лет по ⁸¹Kr) на Скандинавском щите.</p> <p>Нет никаких геохимических аргументов.</p>

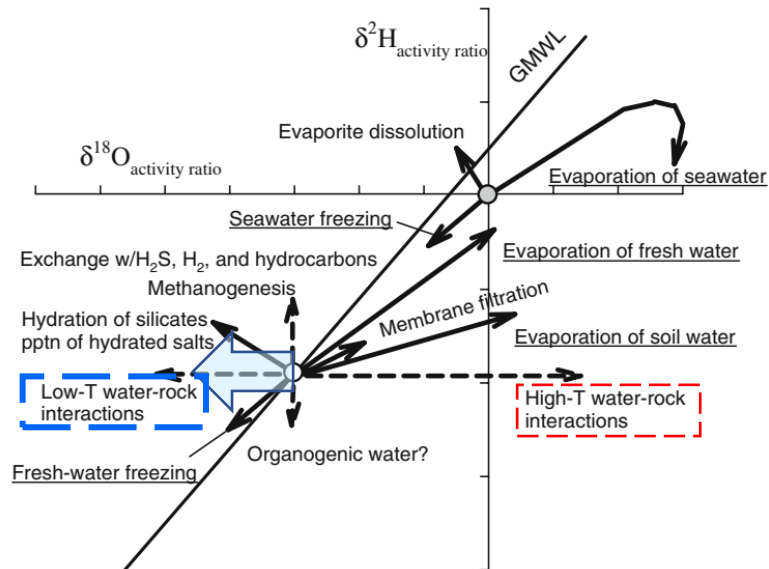
Загадка изотопного состава воды рассолов в кристаллических породах



Изотопный состав воды из кристаллических пород фундамента на диаграмме Тейлора. Сводка данных по России, Финляндии, Швеции, Англии, Зап. и Вост. Европе, Канаде. (По Frare et al., 2014)



Тренды изменения изотопного состава подземных вод при взаимодействии с породой на диаграмме Тейлора. (По Hoefs, 2018)



Систематика изотопных сдвигов при образовании (сплошные стрелки) и метаморфизации (штриховые стрелки) природных рассолов. (По Horita, 2018) По оценке (Warr et al., 2021), ключевую роль играет низкотемпературное взаимодействие рассол/порода.

